



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

LYS OG ENERGI - solceller i transparente facader

Christoffersen, Jens; Hansen, Ellen Kathrine; Hilberth, Thomas; Lauritzen, Hanne; Wedel, Signe Dahl; Jensen, Søren Østergaard; Poulsen, Søren; Bjørn, Erik; Johnsen, Kjeld; Logadóttir, Ásta; Traberg-Borup, Steen; Larsen, Katrin Barrie

Published in:

Slutrapport for PSO F&U projektnr. 2006-1-6302

Publication date:
2008

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Christoffersen, J., Hansen, E. K., Hilberth, T., Lauritzen, H., Wedel, S. D., Jensen, S. Ø., Poulsen, S., Bjørn, E., Johnsen, K., Logadóttir, Á., Traberg-Borup, S., & Larsen, K. B. (2008). LYS OG ENERGI - solceller i transparente facader. I *Slutrapport for PSO F&U projektnr. 2006-1-6302* Arkitektskolen i Århus.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Slutrapport for PSO F&U projektnr. 2006-1-6302

'LYS OG ENERGI – solceller i transparente facader'



Udført af:
Statens Byggeforskningsinstitut, SBI
Arkitektskolen Aarhus
Teknologisk Institut
VELFAC A/S

Projektansvarlig:
Arkitektskolen Aarhus
Nørreport 20
8000 Århus
CVR-nr. 27120717

Indholdsfortegnelse:

Resumé.....	2
Abstract.....	3
1. Indledning	5
2. Lysfilterende solcellepaneler.....	6
3. Tværfaglig tilgang	8
4. Lystekniske målinger	10
5. Termiske forhold	12
6. Workshop.....	15
7. Formidling	16
8. Evaluering af lysfilterende solcellepaneler.....	17
8.1 MSK, 'HQ PV Glass', '44 Wp' og '50 Wp'	18
8.2 RWE Schott Solar, 'ASI-THRU'	20
8.3 GSK/Isolar, 'VOLTARLUX'	22
8.4 Würth Solar, 'WSS0007', 'WSS0008', 'WSS0009'	24
8.5 PhotoSolar, 'PowerShade'	26
8.6 Gaia Solar, Siliciumwafers i rude	29
8.7 Kyosemi corp., 'Sphelar'	31
9. Konklusion	33

Resumé

En grundlæggende udfordring ved udvikling af nye typer solceller og anvendelse af disse i en arkitektonisk sammenhæng er, at solcellen oftest vurderes alene som tekniske og specialiserede monofunktionelle lag med fokus på at fungere som bygningens energieffektive hud.

Formålet med projektet 'Lys & Energi - solceller i transparente facader' er derfor at demonstrere og formidle potentialet for anvendelsen af lysfiltrerende solcellepaneler i forhold til at tilbyde brugeren en multifunktionel komponent, der tilfredsstiller de arkitektoniske målsætninger samtidig med at komponenten bidrager til et godt termisk indeklima, en god indendørs lyskvalitet samt producerer elektricitet.

Projektet er inddelt i seks aktiviteter, hvor den første aktivitet zoomer ind på de lysfiltrerende solceller der findes på markedet i dag, hvorefter der 'zoomes ud' fra selve solcellen til byggekomponenten for at afsluttes i facaden og rummet bagved. Denne rækkefølge, der i vid udstrækning også afspejler den kronologiske udvikling af projektet, er gentaget i slutrapporteringen for at sikre bedst muligt overblik. I de enkelte aktiviteter er karakteriseringen gennemført ved at kombinere tekniske målinger, simuleringer og beregninger med en grundig arkitektonisk vurdering af solcellekomponent, facade og rum for at opnå en samlet, tværfaglig vurdering af solcellepanelerne. Det er vigtigt at understrege, at projektet tager udgangspunkt i de solcelleprodukter der findes på markedet i dag og i nærmeste fremtid.

Mulighederne og idéerne er evalueret og dokumenteret ved hjælp af mock-ups i skala 1:1, da enkelt-elementer, får helt andre kvaliteter, når de integreres i en facade – den platform som projektet er bygget op omkring. Disse modeller i fuld skala giver mulighed for at registrere og opleve lysets karakter såvel indefra som udefra og under forskellige lyssætninger.

To vigtige, håndfaste resultater af projektet er et undervisningsforløb for ca. 40 studerende ved Arkitektskolen Aarhus, som blev afsluttet med en åben udstilling og et idékatalog, hvor de lysfiltrerende solcellers potentiale præsenteres med fokus på en illustrativ formidling på tværs af faggrænser.

I projektet er der identificeret væsentlige potentialer og udfordringer omkring anvendelse af lysfiltrerende solceller som et byggeelement. Det har været vigtigt i projektet at tænke solcellen som et lysfilter og ikke som en erstatning for vinduer – et filter der i kombination med det fuldstændig transparente glas og fuldstændig lysblokerende materialer åbner op for nye muligheder i facadedesign.

Det transparente solcellepanel kan imidlertid ikke stå alene som den eneste lysindtag da både mængde og kvalitet af det lys der transmitteres gennem panelerne ind i rummet oftest er så begrænset at supplerende elektrisk lys er nødvendigt en stor del af året. Desuden hindrer langt de fleste af panelerne udsynet indefra og panelernes mønstring gør farver indenfor samme nuance svære at adskille og der kan opstå forvrængning af udsynet.

Optiske målinger viser, at der er en lineær sammenhæng mellem panelernes g-værdier og åbningsgraderne, dvs. det areal hvorigennem lys kan passere. Det betyder at man, for en givet facadekomposition, kan beregne de aktuelle g-værdier. Beregningerne kan således bruges iterativt i udviklingsfasen af et bygge – eller renoveringsprojekt, til at optimere facadens g-værdi. Det skal understreges, at beregningen kun er gældende for den aktuelle bygning, men da der alligevel skal udføres en beregning på alt nyt byggeri, er g-værdiberegningen en relativt lille del i forhold til det designredskab det er.

Termiske simuleringer har vist, at der for panelerne bliver meget stor forskel i temperatur på det inderste og yderste glas i konstruktionen. Det yderste glas kan blive helt op til 80 grader mens det

inderste glas i lavenergirude/solcelle-kombinationen, bliver mindre varmt end en almindelig lavenergirude. På trods af at den høje temperatur på yderste glas sandsynligvis kun opnås få timer om året, er det et muliggørende dilemma i forhold til anvendelse i enfamiliehuse pga. risikoen for at brænde sig. Det skal bemærkes at denne udfordring eksisterer for flere andre konstruktionsmaterialer/facadebeklædninger og der eksisterer ingen regler på det felt.

Samlet set giver solcellepaneler altså mindre risiko for overophedning inde i rummet end almindelige lavenergiruder, da varmestrålingen afsættes i det yderste lag glas i stedet for at blive transmitteret ind på det inderste glas.

I dagens priser er alle de lysfiltrerende solcellepaneler væsentlig dyrere, målt som pris per Wp, end installationer med konventionelle solceller. Da lysfiltrerende paneler repræsenterer en ny familie af produkter, vil priserne for disse produkter sandsynligvis være langt mindre statisk end prisen på konventionelle solcellepaneler og vil derfor falde hurtigere end prisen på konventionelle solceller, men forventes dog at forblive højere da fremstillingen er mere kompleks.

Projektet er gennemført som et reelt tværfagligt samarbejde mellem Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), Teknologisk Institut, VELFAC A/S og Arkitektskolen Aarhus. Den tværfaglige arbejdsform og en tæt dialog faggrupperne imellem, har været væsentlig for projektets gennemførelse og for sikre forankringen af projektets resultater i de respektive faglige miljøer som vidensopbygning og – spredning. Formidlingsstrategien har gennem hele projektet været at kommunikere budskabet, eksemplerne og resultaterne bredt både nationalt og internationalt gennem kontakt til studerende, ved dedikerede, offentlige arrangementer, i dialog med danske arkitekter og i pressen. Formidlingen har været kendetegnet ved at være generel og overordnet når det var nødvendigt, og målrettet og præcis i andre situationer, hvor et specifikt fagligt indhold skulle kommunikeres.

Abstract

The overall purpose with the project 'LIGHT AND ENERGY –solar cells in transparent facades' is to demonstrate and disseminate the potentials for the application of light-filtering solar cells as multi-functional components, which meets the architectural objectives while contributing to a good indoor climate, a suitable quality of lighting indoor and at the same time produces electricity.

The project was divided into six activities. The first activity 'zooms in' on the light-filtering solar cells on the market today. The following activities gradually 'zoom out' from the solar cell itself to the building component and ends up in the façade and the room behind. This order –which largely reflects the chronological development of the project – is repeated in the final project report to ensure the best possible overview. The characterisation in the different activities has been a combination of technical measurements, simulations, calculations and a thorough architectural evaluation of solar cell component, façade and room for attain an overall, interprofessional evaluation of the solar cell panels. It is important to stress that the basis of the project is the solar cell products available on the market today and in the near future.

The possibilities and ideas have been evaluated and documented using mock-ups in 1:1 scale since the individual components have completely other qualities when they are integrated in a façade – the platform of this project. These models in full scale are a possibility to register and experience the character of the light inside out and under different light settings.

Two important, tangible results of the project is an educational course for about 40 students at the Aarhus school of Architecture which was concluded with an open exhibition, and a catalogue in

which the potentials of light-filtering solar cells were presented with focus on an illustrative interdisciplinary dissemination.

It has been important to think of the solar cell filter as a part of the architecture instead of a replacement for windows and actively use the light-filtering features as a possibility in new façade designs – a filter which in combination with the completely transparent glass and completely light-blocking materials opens up for new possibilities in façade design.

The transparent solar cell can not be the only source of light in the room since both the amount and the quality of light transmitted through the solar cell into the room often is so limited that additional electrical light will be necessary most of the year. In addition most of the panels obstruct the view from within and the patterning of the panels makes it hard to differentiate between colors in the same nuance.

Optical measurements show a linear relation between the g-value of the solar cell panels and the aperture area i.e. the area through which the light can pass. This means that for any certain composition of the façade, the g-value can be calculated. The calculations can thus be used iteratively in a development phase of a building- or modernisation project to optimize the g-value of the façade. Notice that the calculations are only valid for the actual building but since calculations are needed for all new building projects, the g-value calculation is a relatively small part compared the benefit as a design tool.

Thermal simulations have shown a large difference in temperature between the inner and outer glass in the panel. The outer glass can be as hot as 80 °C while the inner glass in a low-energy window/solar cell construction will be less hot compared to a standard low-energy window. In spite of the fact that the elevated temperature on outer glass most likely will only occur few hours a year this might be a dilemma for application in single-family houses due to the risk of burns. This issue exists for other construction materials as well.

Overall solar cell panels minimises the risk for overheating inside the room compared to regular low-energy windows because the thermal radiation is absorbed in the outer glass pane instead of being transmitted onto the inner pane.

In current prices all the light-filtering solar cell panels are significantly more expensive – measured in price pr. Wp compared to installations with conventional solar cells. Since light-filtering solar cells represent a new family of products, the prices for these products are probably much less static than the price for conventional solar cell products. Thus the prices are expected to decline more rapidly than conventional solar cells but stabilise at a higher level due to the more complex production.

The project was carried out as an actual interdisciplinary cooperation between Danish Building Research Institute (SBI), Danish Technological Institute, VELFAC A/S and Aarhus School of Architecture. The interdisciplinary working form and a close dialogue between the partners has been important for the completion of the project and in order to ensure a good knowledge compilation and dissemination in all the partners' different fields of expertise. The dissemination strategy through the entire project has been to communicate message, the examples and the results both nationally and internationally through contact with students, through dedicated public appearances, in dialogue with Danish architects and in the media. The dissemination has been characterized as being general-purpose when needed and dedicated and precise in other situations when exact specialist knowledge was communicated.

1. Indledning

Formålet med projektet 'LYS OG ENERGI - solceller i transparente facader' er at demonstrere og formidle potentialet for anvendelsen af lysfiltrerende solcellepaneler i forhold til at tilbyde brugeren en multifunktionel komponent, der tilfredsstiller de arkitektoniske målsætninger samtidig med at komponenten bidrager til et godt termisk indeklima, en god indendørs lyskvalitet samt producerer elektricitet.

Projektet er inddelt i seks aktiviteter, hvor den første aktivitet er omkring de lysfiltrerende solceller – den teknologi, som dette projekt tager udgangspunkt i, hvorefter der 'zoomes ud' fra teknologien til byggekomponenten for at afsluttes i facaden og rummet bagved. Denne rækkefølge, der i vid udstrækning også afspejler den kronologiske udvikling af projektet, er gentaget i slutrapporteringen for at sikre bedst muligt overblik. I de enkelte aktiviteter er karakteriseringen gennemført ved at kombinere tekniske målinger, simuleringer og beregninger med de arkitektoniske potentialer i forhold til oplevelsen af komponent, facade og rum for at opnå en samlet, tværfaglig vurdering af solcellepanelerne.

Mulighederne og idéerne er evalueret og dokumenteret ved hjælp af mock-ups i skala 1:1, da enkelt-elementer, får helt andre kvaliteter, når de integreres i en facade – den platform som projektet er bygget op omkring. Disse modeller i fuld skala giver mulighed for at registrere og illustrere lysets karakter såvel indefra som udefra og under forskellige lyssætninger. Det er vigtigt at understrege, at projektet tager udgangspunkt i de solcelleprodukter der findes på markedet i dag og i nærmeste fremtid.

Projektets to mest konkrete resultater er en workshop for studerende ved Arkitektskolen Aarhus, jfr. afsnit 6 Workshop, og et idékatalog, hvor projektets resultater præsenteres med fokus på en illustrativ og læsbar formidling af værdierne på tværs af faggrænser, se bilag 11. Netop workshoppen blev udgangspunkt for en positiv drejning i projektet idet Arkitektskolen Aarhus, Institut for Arkitektonisk Design, valgte at gøre aktiviteterne omkring lys, energi og arkitektur, til fælles tema for alle studerende ved 3. til 5. studieår. Det betyder, at workshoppen 'LYS+ENERGI+ARKITEKTUR' blev integreret i alle studieplaner på instituttet i 2007.

I løbet af projektet er der desuden etableret en materialesamling med alle de indkøbte solcellepaneler, som skal fungere som inspiration og status for lysfiltrerende solcelleprodukter anno 2006/2007 for alle interesserede.

Projektet er gennemført som et reelt tværfagligt samarbejde mellem Statens Byggeforskningsinstitut, SBI, Teknologisk Institut, VELFAC A/S og Arkitektskolen Aarhus. Den tværfaglige formidling og løbende dialog omkring prioritering faggrupperne imellem, er en væsentlig aktivitet i dette projekt for at sikre at projektets resultater forankres i de respektive faglige miljøer som vidensopbygning og – spredning.

Som en del af vor forpligtigelse i henhold til kontrakten, er der videresendt måleresultater samt rapport og data-analyse for panelet leveret af Gaia Solar/IdealCombi til projektet "Forenklet integration af solceller i vinduessystemer – videreudvikling og demonstration af samlet løsning" (projekt 2005-2-6291).

2. Lysfilterende solcellepaneler

En væsentlig aktivitet i projektet har været at skaffe sig et overblik over hvilke lysfilterende solcelleprodukter der er tilgængelige internationalt, da dette var udgangspunktet for hvilket materiale vi kunne arbejde med i resten af projektet.

Der er således udarbejdet en produktoversigt, som giver et billede af, hvilke relevante solcellemoduler og enkeltceller der fandtes på markedet primo 2006. Ved udarbejdelsen af denne produktoversigt, er der ikke blevet lagt vægt på at skabe en fuldstændig oversigt over produkter på markedet, men på at identificere celler med kvaliteter, der kan være interessante i transparente facader og endvidere celler, som i sit udseende adskiller sig fra de "standard" celler som dominerer markedet i dag. Den udarbejdede oversigt findes i bilag 1A-1D, hvor produkterne er sorteret i følgende kategorier: krystallinske silicium solceller, celler af amorft silicium, fleksible solceller og andre tyndfilmsceller.

Ved udvælgelsen af produkter er der lagt vægt på, at panelet eller cellerne har en form for transparens, enten ved at der er transparente områder mellem de enkelte celler, eller ved at selve solcellen er transparent/lysfilterende.

I projektet er der leveret paneler fra 7 forskellige producenter; amorf silicium fra GSK/Isolar, MSK og RWE Schott Solar, CIS moduler fra Würth Solar, polykrystallinske silicium wafers fra Gaia/Idealkombi og transparente monokrystallinske solceller fra Sunways, se tabel 1. Desuden leverede PhotoSolar en prototype på deres passive produkt "Microshade", som fungerer som en transparent solafskærmning, men endnu uden solcellefunktion. Det aktive produkt 'PowerShade' har samme design, blot belagt med amorf silicium.

Derudover er det lykkedes os at låne et panel fra Kyosemi corp. af typen 'Sphelar', som p.t. ikke er kommercielt tilgængeligt. Dette er et specielt panel, som består af 40.000 sfæriske Si-celler, som er monteret mellem to lag glas. Der er p.t. kun produceret 2 paneler af denne type. På grund af cellernes kugleform, reflekterer og absorberer dette panel lyset på en helt anden måde end de øvrige paneler.

Panelerne er primært karakteriseret lysteknisk for at beskrive, hvordan dagslysindtaget gennem en rude eller en facade påvirkes af det aktuelle panel. Endvidere er panelernes evne til at producere strøm karakteriseret. Da ydelsen for de kommercielle paneler i stor udstrækning kan forudsiges ud fra de data, som opgives af leverandøren, samt solens indfaldsvinkel, har vi valgt ikke at bruge væsentlige ressourcer på at karakterisere disse paneler, men hellere fokusere på Kyosemis panel, jfr. bilag 2. Dette panel vil på grund af cellernes kugleform have et fundamentalt anderledes ydelsesforløb end de øvrige paneler, som er plane, både hen over dagen og hen over året. For at kunne sammenligne dette panel med de øvrige paneler, er det derfor vigtigt at kortlægge, hvordan ydelsen for Kyosemis panel varierer med solens indfaldsvinkel og intensitet.

Billeder af alle paneler kan ses i bilag 3.

Producent	Produktnavn	Type	Optik		Forventet årlig strømproduktion (kWh)		Kommentar
			Åbnings-grad (%)	g-værdi	Pr. panel	Pr. m ²	
MSK	HQ PV Glass, 44 Wp	Si, amorf	10	0,09	30	30	Kommerciel
	HQ PV Glass, 50 Wp	Si, amorf	4	0,07	35	35	
Schott Solar	ASI-THRU	Si, amorf	10	0,10	20	30	Kommerciel
GSK	VOLTARLUX	Si, amorf	20	0,15	30	15	Kommerciel
Würth Solar	WSS0007	CIS	8	0,09	45	60	Kommerciel
	WSS0008	CIS	21	0,15	30	40	
	WSS0009	CIS	22	0,16	25	35	
Kyosemi	Sphelar	Si kugler	58	0,35	7	24	Prototype
PhotoSolar	Powershade	Si, amorf	45	0,09-0,23	80	44	Model Værdier er estimeret.
Sunways	AH814000	Si, mono	10		1	80	Enkeltcelle!
Gaia Solar		Si, poly	34	0,23	100	65	Kommerciel
Ref, lysmåling	Interpane	Si, multi	49	0,20	50	40	Kommerciel
Standard mc Si		Si, multi	0		105	105	Kommerciel

	Data er omregnede fra det passive MicroShade til det aktive PowerShade under forudsætning af ens panelstørrelse.
	g-værdier målt på DTU.
	Åbningsgrader målt på DTU
	g-værdi beregnet hvor solcellerne er placeret yderst i en lavenergirude
	Forudsætninger: sydvendt, i DK, hældning på 90 gr (lodret montering), ingen skygger, er en installation på 1 kWp, tilsluttes elnettet via en moderne og effektiv vekselretter

Tabel 1. Oversigt over leverede lysfiltrerende solcellepaneler

Målinger og resultater er samlet i fact sheets for de enkelte paneler i materialesamlingen for at opnå en tydelig læsning og gode muligheder for at sammenligning af værdierne. Målte data, data opgivet af producenterne og beregnede data er samlet i bilag 4.

De lysfiltrerende solcellepaneler der er anvendt i nærværende projekt har en el-produktion – afhængig af producent - svarende til mellem 30 % og 75 % set i forhold til tilsvarende konventionelle paneler af amorf silicium.

Afsøgningen af markedet har vist, at det er en væsentlig udfordring at købe lysfiltrerende solcelleprodukter på grund af at efterspørgslen på solceller generelt er meget stor, men også fordi mange af de nye produkter og designs rettet mod filtrering af lys er på demo-niveau og er derfor ikke kommercielt tilgængelige, f.eks. 'Sphelar' og 'PowerShade', som er vurderet i projektet.

I dagens priser er alle de lysfiltrerende solcellepaneler væsentlig dyrere, målt som pris per Wp, end installationer med konventionelle lysblokerende (tyndfilm og krystallinske) solceller. Da lysfiltrerende paneler repræsenterer en specialiseret og fuldstændig ny familie af produkter, vil priserne for disse produkter sandsynligvis være langt mindre statisk end prisen på konventionelle solcellepaneler. Generelt gælder, at i takt med at udbredelsen stiger og markedet øges, falder prisen på et givent produkt – denne tendens forventes også at gøre sig gældende for lysfiltrerende solceller. Dog forventes prisen på de mere specialiserede lysfiltrerende solcelleprodukter at forblive højere end traditionelle solcelleprodukter da fremstillingen er mere kompleks. De semitransparente solcellepaneler der er anvendt i nærværende projekt har en el-produktion – afhængig af producent - svarende til mellem 30 % og 75 % set i forhold til tilsvarende konventionelle paneler af amorf silicium.

Arbejdet med integration af solcellepanelerne i facader har vist, at der er en udfordring omkring ledninger, stik og lignende, der knytter sig til det faktum at elementerne er elektriske ledende. For at solcellepanelerne kan bruges frit i facaden – også gerne i bevægelige installationer, er det vigtigt at bagsiden af solcellerne er frie for strømsik og koblingsbokse. Det kan muligvis løses ved have ledninger og lignende gemt i panelets ramme eller med strømledende skinnesystemer.

En samlet evaluering af solcellernes potentiale som arkitektonisk attraktivt element til regulering af lys og indeklima, såvel som energiproducerende solcellepanel beskrives i afsnit 8: Evaluering af lysfiltrerende solcellepaneler.

I forhold til et kommende projekt viser erfaringer fra 'Lys og Energi-solceller i transparente facader' at i stedet for, som i dette projekt, at arbejde med flere paneler fra 7 forskellige producenter, vil det være attraktivt at evaluere et enkelt produkt på flere forskellige niveauer - f.eks. ved at anvende 4 forskellige typologier af facader og afprøve forskellige designs af filtre.

3. Tværfaglig tilgang

En væsentlig målsætning i 'Lys og Energi' var at videreføre og udvikle det tværfaglige samarbejde grundlagt i det tidligere projekt 'Transparente Solceller' (PSO F&U 4770) for at opnå en ægte synergi mellem forskellige fagdiscipliner; arkitektur, lystekniske og termiske vurderinger samt solcelletekniske målinger for et facadeelement.

Dette kan synes enkelt, men erfaringen er, at det er langt fra trivielt at favne så bredt fagligt i en projektgruppe, blandt andet fordi succeskriterierne for de enkelte partnere kan være meget forskellige og i perioder trække i hver sin retning. Eksempelvis vil integration af solceller i facader ofte betyde lodret montering, men ud fra et rent solcelleteknisk synspunkt, er montering af solcellen i 45 grader bedre, da den elektriske ydelse af solcellen er størst dér.

I processen med fælles udvikling - og kommunikation af værdierne i projektgruppen, projektets workshop 'LYS + ENERGI + ARKITEKTUR' og ikke mindst ved formidlingen af projektets resultater, har vi fundet behov for at udvikle nye metoder og redskaber. Vi har forsøgt at skabe en tværfaglig forståelse for værdierne lige fra *målingerne* i de tekniske laboratorier, over *beregninger* af tekniske data, *teoretiske udfoldninger* af begreber til definering af æstetiske potentialer til oplevelsesorienterede *empiriske registreringer*.

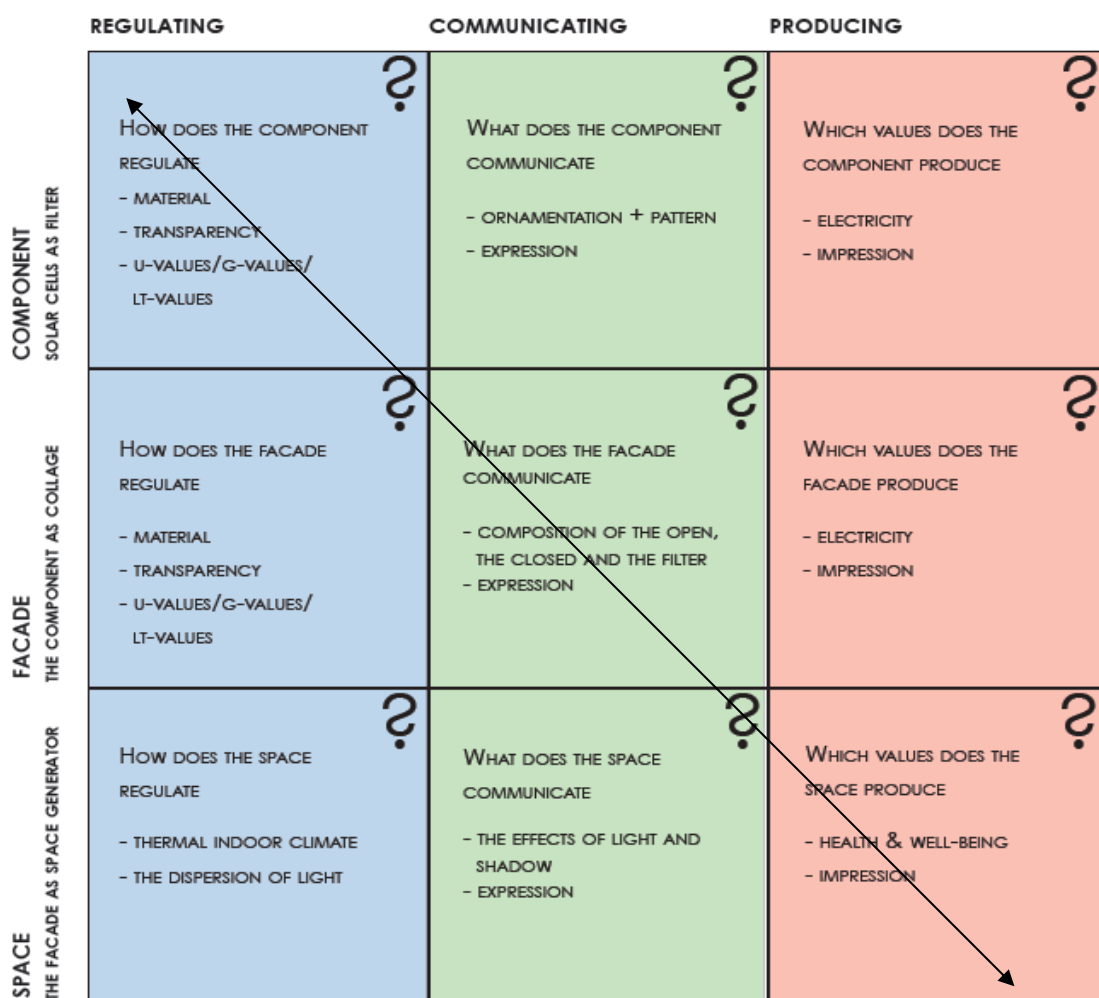
En grundlæggende udfordring i frembringelsen af arkitektur er fornemmelsen for, hvordan de enkelte byggekomponenter præsenterer sig i deres omgivelser som en del af en helhed – en del af

en rumlig komposition såvel som en del af facaden. Ved udvikling og bygningsintegration af nye typer solceller er udfordringen ekstra stor. Disse teknologier bliver ofte udviklet og vurderet som monofunktionelle lag, og ikke som komponenter der skal fremtræde i en arkitektonisk sammenhæng.

Målet er at få disse tekniske og specialiserede lag udviklet til multifunktionelle lag i facaderne. Lag der tilfører flere betydninger end blot at fungere som bygningens energieffektive hud. Problemet er, at det er vanskeligt at kommunikere, og det er svært at opnå den ønskede synergi, når de tværfaglige værdier skal sammenstilles og vægtes overfor hinanden. Ofte resulterer dette i at de tekniske let definer- og målbare værdier bliver udgangspunkt for værdisætningerne for komponenterne, mens de æstetiske værdier ikke integreres tilstrækkeligt.

Matrix

Som redskab til at sammenstille tværfaglige værdier og formidling af resultater, er der i projektet udviklet en matrixstruktur, hvor værdierne er delt op i tre genstandsfelter; komponent, facade og rum på den ene akse og i tre forhold; kommunikerende, regulerende og producerende værdier på den anden akse. Matricen er tænkt som et redskab til i processen at stille og besvare de rigtige spørgsmål for en mere holistisk vurdering af komponenten. Samtidig skal den fungere som et kommunikationsmiddel, hvor forskningsprojektets resultater kan systematiseres for på overskuelig vis at beskrive hver solcellekomponent i et tværfagligt perspektiv.



Figur 3.1 Matrixstruktur

Spændet i denne matrix anskueliggør de tværfaglige værdier. Derved søger vi at vurdere de forskellige komponenter mere holistisk. Metoden anskueliggør ikke mindst hvilke spørgsmål der skal stilles og besvares for karakterisering af en komponent.

Tilsammen udgør matricerne for solcellepanelerne en produktoversigt, der har til mål, at beskrive egenskaberne ved transparente solceller samt vurdere hvordan vi kan indplacere fremtidens teknologiske byggekomponenter i et holistisk perspektiv, og stille de ikke målbare værdier overfor de målbare.

I diagonalen fra venstre øverste hjørne (den regulerende komponent) til højre nederste hjørne (det producerende rum) ligger spændet mellem den fysiske (lys- og klimaregulerende) vurdering af den fysiske komponent til vurderingen af, hvad rummet producerer i mennesket, altså hvordan rummet påvirker mennesket. Fra den fysiske komponent, hvor *effekten* defineres, som er den traditionelle værdisætning, til hvilket indtryk komponenten gør på individet, her defineres *affekten*. Sidstnævnte bør være en væsentlig værdiparameter, men forbigås ofte, idet det den kan være vanskelig at definere.

En mere omfattende beskrivelse af matricens genstandsfelter, komponent, facade og rum samt værdiparametrene; regulerende, kommunikerende og producerende findes i bilag 5.

Projektgruppen vurderer at de gode arbejdsredskaber og resultater der er opnået gennem projektet er kommet netop fordi der reelt er arbejdet på tværs af faggrænser.

Arbejdet omkring forberedelse og afholdelse af workshoppen 'LYS+ENERGI+ARKITEKTUR' skabte et vigtigt fællesskab projektpartnerne imellem og fungerede som en god, praktisk og konkret platform ud over at den naturligvis gav væsentlige bidrag til projektets resultater. Den tværfaglige indgang har også høstet anerkendelse blandt 'neutrale' deltagere i workshoppen, hvor 'hard core teknik og måling blev udfordret af en kreativ synsvinkel, som mangler de fleste andre steder man kan se/læse om solceller' (Jørgen Søndermark, Realea).

En indikator på succes omkring samarbejdet er, at projektdeltagerne gennem projektet er begyndt at anvende specifikke termer fra andre fagområder, hvilket opfattes som et udtryk for en større indsigt og forståelse for hinandens faglighed, hvilket er udgangspunktet for en succesfuld integration af nye teknologier på flere faglige niveauer.

Det tager tid og ressourcer at bygge et velfungerende tværfagligt samarbejde op, men vi er kommet et væsentligt skridt videre i 'Lys og Energi -solceller i transparente facader'.

4. Lystekniske målinger

Formålet med de lystekniske målinger var at etablere en procedure for at evaluere de forskellige solcellepaneler ud fra et sammenligneligt grundlag i forhold til det enkelte panels evne til at formidle dagslys i rummet.

Målingerne blev udført af Statens Byggeforskningsinstitut i tre almindelig tomme kontorer med lyse overflader svarende til almindelig praksis. Rummet målte 3,45 m (bredt) * 4,75 m (dybt) med en loftshøjde på 3,0 m. På grund af de forskellige størrelser på de udvalgte paneler, valgte vi et glasareal på 0,96m (bredt) og 0,93m (højt). Panelerne blev sammenlignet med to referencesituationer; et traditionelt solcellepanel og et almindelig vindue med en persienne, jfr. Bilag 6.

I vurdering af panelernes evne til at formidle dagslys i rummet, anvendte vi to parametre til beskrivelse af dagslyskvantiteten og en parameter til beskrivelse af dagslyskvalitet:

1. Dagslysfaktor på arbejdsplanet ved en overskyet himmel
2. Relativ belysningsniveau på arbejdsplanet ved en klar blå himmel og direkte sol
3. Evnen til at opretholde udsyn til det fri

Vurderingen af panelernes evne til at formidle dagslys i rum blev udført som et øjebliksbillede, det vil sige, at der kun blev udført et sæt målinger på hvert panel. For at kunne dokumentere en mere fuldstændig lysteknisk beskrivelse af panelerne bør målinger ved en klar blå himmel og direkte sol udføres på tre udvalgte tidspunkter af året; vinter og sommer (min og max solhøjde), samt forår (middel solhøjde). Dog vil dagslysfaktoren og evnen til udsyn være uforandret af årstid. De målte dagslysfaktorer i rummet for de enkelte lysfiltrerende tyndfilmceller viste, at Bygningsreglementets vejledning om tilstrækkelig dagslys (mindst 2%) ikke blev imødekommet. Der vil være behov for yderligere åbne, transparente områder i facaden.

Det relative belysningsniveau angiver belysningsforholdet i rummet ved klar blå himmel og direkte sol. De lysfiltrerende tyndfilmceller har alle smalle transparente spor, der var skåret ud i filmen. Det medfører, at på en klar dag med direkte sol, passerer sollyset uhindret igennem de transparente spor og giver, i korte regelmæssige perioder, relativt store variationer i belysningsstyrken inde i rummet. Denne variation vil afhænge af solens placering på himlen, hvilket kan medføre gener for den enkelte person i rummet og indebære behov for supplerende solafskærmning.

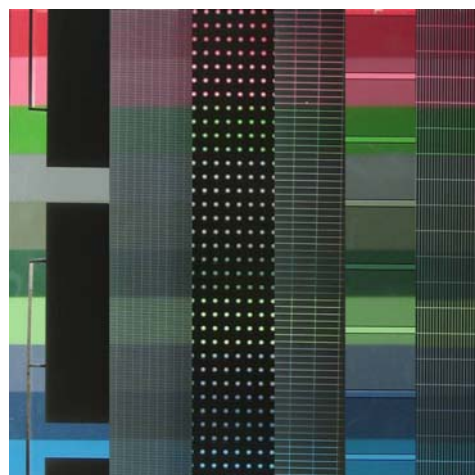
Ved lav solhøjde vil sollyset komme langt ind i rummet, mens solens indtrængning er begrænset, når solen står højt på himlen.

Udsynet til det fri blev vurderet ved en subjektiv evaluering af en farvepalet, se figur 4.1 og eventuelt bilag 7 for alle enkeltpaneler. Resultatet viste, at farvegengivelsen af udsynet gør det svært at skelne mellem farver indenfor samme nuancer. Den lystekniske procedure har vist sig at give en fornuftig indikation af de enkelte systemers evne til at formidle dagslys i rummet, men der bør indarbejdes en mere systematisk objektiv procedure for, hvordan brugeren af et rum vil forholde sig til oplevelsen af en facade med disse lysfiltrerende tyndfilmceller.

Et hovedmål i projektet har været at tænke filtret som en del af arkitekturen i stedet for som en erstatning for vinduer.

Panelernes lysfiltrerende beskaffenhed åbner netop op for nye muligheder i facadedesign.

Det transparente solcellepanel kan imidlertid ikke stå alene som den eneste lyskilde da både mængde og kvalitet af det lys der transmitteres gennem panelerne ind i rummet oftest er så begrænset at supplerende elektrisk lys er nødvendigt en stor del af året. Desuden hindrer langt de fleste af panelerne udsynet indefra og panelernes mønstring begrænser at farver indenfor samme nuance er svære at skelne og der kan opstå forvrængning af billeddannelse/ konturer.



Figur 4.1. Solceller holdt op mod farvepanel

5. Termiske forhold

Formålet med solceller i transparente facader udspringer ofte af et ønske om at reducere solindfaldet til bygningen for derved at mindske bygningens overophedningsproblemer og dermed kølebehov i bygningen – samtidigt med, at der stadig er noget af lysindfaldet igennem de felter, hvor solcellerne placeres.

Det er dog meget svært at karakterisere et solcellepanels indvirkning på de termiske forhold i en bygning, idet det afhænger af bygningens udformning og anvendelse, af de tekniske installationer i bygningen (varme-, ventilations- og køleanlæg), af hvor stor en del af facaden der består af solcellepaneler, samt hvor disse solcellepaneler er placeret i facaden.

I stedet for at karakterisere solcellepanelernes direkte indvirkning på det termiske indeklima er der i dette projekt i stedet fokuseret på at beskrive, hvordan solcellepanelerne indvirker på det energiforbrug, der er nødvendigt for at opretholde et godt termisk indeklima. På denne måde kvantificeres indeklimaforholdene, og det er muligt at vurdere, hvad det rent energimæssige koster at skabe tilfredsstillende termiske forhold i en bygning, og dermed skabes der basis for at vælge mellem forskellig mængde af solcellepaneler i en facade.

Solceller i transparente facader kan som nævnt medvirke til at reducere eller fjerne overophedningsproblemer i en bygning og dermed reducere eller fjerne kølebehovet. Men solcellerne forhindrer samtidigt solvarme i at trænge ind i bygningen på tidspunkter, hvor der er opvarmningsbehov og vil dermed medvirke til en forøgelse af opvarmningsbehovet. Samtidigt mindsker solcellerne lysindfaldet, hvilket vil lede til et øget behov for kunstlys i bygningen, se afsnit 4; Lystekniske målinger. Det gælder således om at finde et optimum for flere modsatrettede tendenser.

For at kunne beregne energiforbruget til køling, opvarmning og kunstlys, er det nødvendigt at fastlægge de optiske og termiske forhold for vinduer med solceller i det yderste lag glas. Seks af de indkøbte solcellepaneler blev derfor sendt til BYG-DTU for at blive gennemmålt i deres goniospektrometer, hvor transmittansen og reflektansen for panelerne blev detaljeret bestemt. BYG-DTU har herefter beregnet g-værdier og dagslystransmittans for ruder, hvor solcellepanelerne er monteres som det yderste lag i en traditionel termorude og en lavenergirude. Målinger og beregninger er udførligt beskrevet i bilag 8. Nedenstående tabel viser g-værdier og dagslystransmittanser for de seks solcellepaneler integreret i lavenergiruder med en U-værdi på 1,2 W/m².

Producent	Produktnavn	Total solenergi-transmittans, g	Dagslystransmittans, τ
Würth Solar	WSS0007	0,09	0,06
	WSS0008	0,15	0,15
	WSS0009	0,16	0,16
MSK	HQ PV Glass 44 Wp	0,09	0,07
	HQ PV Glass 50 Wp	0,07	0,04
Interpane	Reference	0,20	0,22

Tabel 5.1. Beregnede g-værdier og dagslystransmittanser for de 6 solcellepaneler, hvor disse er monteret som det yderste lag i en lavenergirude med en U-værdi på 1,2 W/m².

De målte/beregnete værdier fra tabel 4.1 for de seks solcellepaneler er vist grafisk i figur 5,1 som funktion af panelernes åbningsgrad – åbningsgraden er den procentdel af panelet, hvor lyset kan trænge igennem. I figur 5.1 er desuden indsat en dagslystransmittans for en åbningsgrad på nul

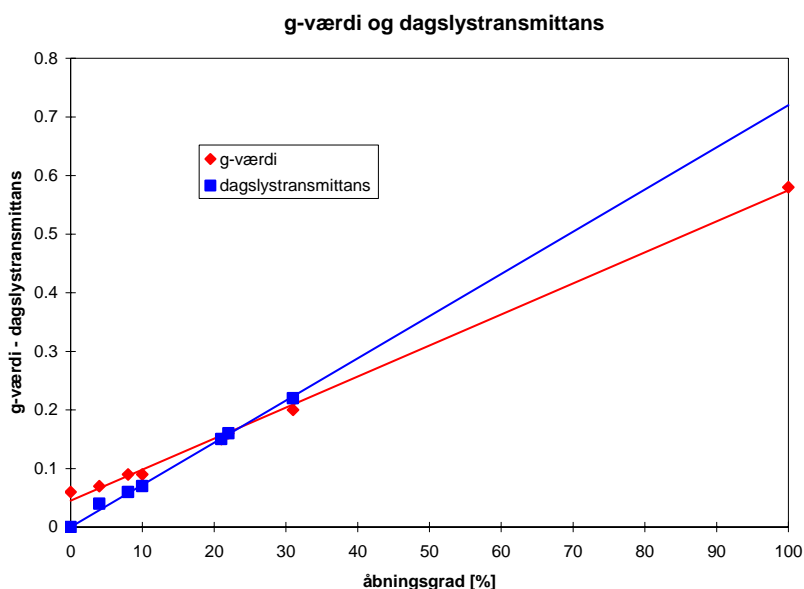
samt beregnede g-værdier for ruder med helt dækkende solceller (åbningsgrad = 0%) eller ingen solceller (åbningsgrad = 100%). Som det ses af figur 5.1, er der for lysfiltrerende solcellepaneler en lineær sammenhæng mellem panelernes åbningsgrad og henholdsvis g-værdien og dagslystransmittansen. Dvs. det er ikke nødvendigt at gennemføre detaljerede målinger på solcellepaneler af denne type for at bestemme deres g-værdi og dagslystransmittans, hvor de er monteret i en lavenergirude. Hvis blot panelernes åbningsgrad kendes, så kan de to værdier aflæses på kurverne i figur 5.1, eller findes ved at indsætte i følgende to ligninger, afledet af graferne:

$$\text{g-værdi i lavenergirude: } g = 0,045 + 0,53 \cdot A$$

$$\text{dagslystransmittans: } \tau = 0,0072 \cdot A$$

hvor A er panelernes åbningsgrad.

Ovenstående udtryk kan ikke anvendes i forbindelse med vinkelselektive solceller som 'PowerShade' fra PhotoSolar, da g-værdien her er afhængig af solhøjden og derfor ændres over både dagen og året. Udtrykkene kan sandsynligvis heller ikke anvendes i forbindelse med 'Sphelar' fra Kyosemi.

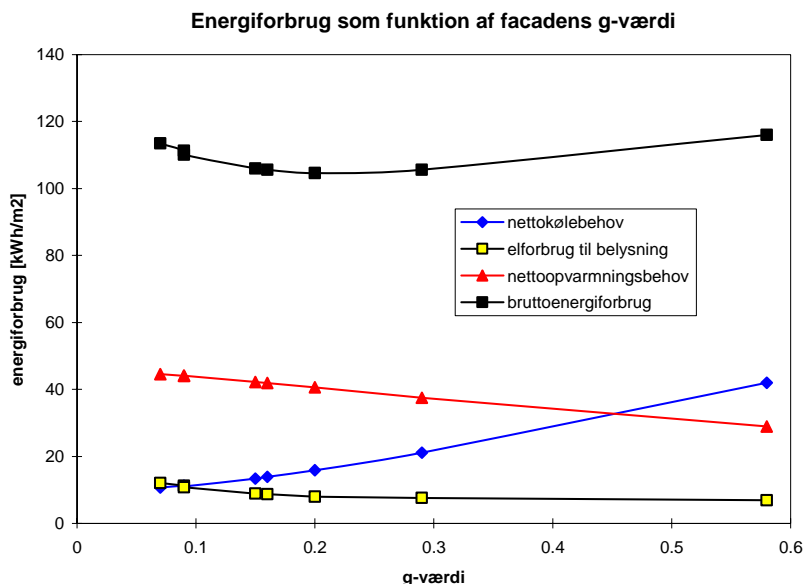


Figur 5.1 Beregnede g-værdier og dagslystransmittanser for de 6 solcellepaneler, hvor disse er monteret som det yderste lag i en lavenergirude med en U-værdi på 1,2 W/m².

Figur 5.1 betyder, at man ved vurdering af effekten af solcellepaneler i de transparente facader i en bygning blot skal beregne den gennemsnitlige g-værdi for de transparente facader – hvis facaden består af en kombination af ruder med og uden solcellepaneler - for at kunne vurdere bygningens energiforbrug.

Figur 5.2 viser energiforbrugene for én etage i et nyere kontorbyggeri afhængig af facadens gennemsnitlige g-værdi. g-værdien for de seks solcellepaneler fra tabel 5.1 er vist som punkter. Energiforbruget er beregnet med programmet Be06, som anvendes til vurdering af om nye bygninger overholder energikravene i bygningsreglementet. I stedet for Be06 kan Bsim anvendes. Dette er gjort i bilag 9, hvor beregningerne er detaljeret forklaret.

Figur 5.2 viser nettokølebehov, nettovarmebehov, elforbrug til belysning samt bygningens samlede bruttoenergiforbrug. Punkterne på kurverne viser energiforbrug for situationer, hvor hele den transparente sydfacade er helt dækket med en af de seks typer solcellepaneler eller ruder uden solcellepaneler (g-værdi = 0,58). Energiforbruget er årligt energiforbrug angivet som kWh/m², hvor m² henfører til etagearealet.



Figur 5.2 Nettovarme- og nettokølebehov, elforbrug til belysning samt bruttoenergiforbrug beregnet med Be06 afhængig af den gennemsnitlige g-værdi for sydfacaden.

Figur 5.2 viser som ventet et stigende kølebehov med stigende g-værdi og en modsatrettet tendens for varmebehovet og elforbruget til belysning. Men samlet set opstår der et minimum for bygningens bruttoenergiforbrug ved en g-værdi på 0,2, hvor kurven dog er relativt flad mellem 0,15 og 0,3. Facaden skal altså i dette tilfælde optimeres efter en samlet g-værdi på mellem 0,15 og 0,3. Figur 5.2 kan kun anvendes for den aktuelle kontorbygning. Andre bygninger vil sandsynligvis fremvise en anden tendens. Det er dog relativt nemt at generere en graf som figur 5.2, som det vises i bilag 9. Da der alligevel skal udføres en B06 beregning på alt nyt byggeri, er g-værdiberegningen en relativt lille del i forhold til det vigtige redskab grafer som figur 5.2 vil være, når bygninger med solceller i de transparente facader skal designs. Metoden bør dog testes i forbindelse med andre bygninger og evt. videreudvikles.

Solceller bliver varme, når solen skinner på dem – op til omkring 70°C. Man kan derfor frygte, at det inderste glas i ruder med solceller udvendigt vil blive så varme, at det forringer komforten i rummet bag ruderne. På baggrund af målinger og beregninger i bilag 8 er rudernes optiske karakteristika fuldstændig blevet beskrevet (bilag 9). Disse data er anvendt i det meget detaljerede simuleringsprogram ESP-r, der også kan simulere den opvarmning, der sker i de to glas i en solcelle-rude. Simuleringerne viser ganske rigtigt, at det yderste glas med solceller i korte perioder når op på lige over 70°C, mens det inderste glas, når det er varmest, er 3-4 grader koldere end det inderste glas i en lavenergirude uden solceller. Dette skyldes, at den tunge gas og den lavemissive belægning i en lavenergirude sikrer, at kun lidt af varmen fra det yderste glas når det inderste glas. Til gengæld absorberes omkring 10% af solenergien, der rammer ruden, i det inderste glas i en lavenergirude uden solceller, mens solcellerne forhindrer størstedelen af solens stråler i at ramme det inderste glas i ruderne med solceller. I en gammeldags termorude vil det inderste glas blive omkring 2 grader højere i ruder med solceller end i ruder uden.

6. Workshop

Når arkitektstuderende på Arkitektskolen Aarhus tilegner sig viden og færdigheder omkring solceller, sker det med henblik på at skabe visioner for fremtidens bæredygtige byggeri ved at udnytte lysets potentialer såvel æstetisk som teknisk.

Samfundet står overfor meget store udfordringer for at nedbringe brugen af de fossile brændstoffer i driften af vores bygninger. Nye energiteknologier som solceller kan ud over at producere energi integreres i facaden og vise nye måder at udnytte solens potentiale til at regulere indeklima og dagslysindtag i glasfacaderne.

Den store udfordring er, at udvikle disse teknologier så de kan integreres i byggeriet i et holistisk perspektiv, hvor energiproduktion, varmeregulering og lysindtag udgør en arkitektonisk enhed. Denne udfordring blev i efteråret 2007 adresseret i workshoppen 'LYS+ENERGI+ARKITEKTUR' på Arkitektskolen Aarhus.

På workshoppen deltog omkring 40 danske og internationale arkitektstuderende for at undersøge hvordan nye transparente solceller, ud over at producere energi og regulere indeklima, kan bidrage til et arkitektonisk helhedsbillede. Workshoppen var led i arkitektskolens politik om at integrere forskning i undervisningen og omvendt, undervisning i forskningen.

Inden workshoppen var solcellepanelernes lysfiltrerende egenskaber blevet målt i lyslaboratoriet på SBI og de termiske og energiproducerende egenskaber blev undersøgt af Teknologisk Institut. Arkitektskolens opgave var bl.a. gennem denne workshop definere de æstetiske potentialer og kombinere dem med de tekniske værdier.

I tre indledende øvelser udviklede de studerende redskaber til analyse og oplevelse af de æstetiske potentialer, solcellekomponenterne indeholder. En forståelse for en ny byggekomponent og dens muligheder i facadekomposition og rumlige sammenhæng blev dannet.

Derefter kombineredes komponenternes tekniske værdier med de oplevede æstetiske potentialer. Dette udgjorde parametrene for de 6 grupper studerende til en holistisk programmering af 6 rumstore modeller. Udgangspunkt til modellerne dannedes af en given, konstruktiv ramme på hjul, indenfor hvilken de rumlige fænomener skulle udfolde sig. Gennem præcise installationer i disse mobile rammekonstruktioner fremhævede de studerende særlige æstetiske aspekter af de transparente tyndfilmsolcellepaneler i et skalaløst, men tilgængeligt rum. Alle 6 rummodeller blev senere vurderet af en tværfaglig ekspertgruppe og præsenteret til det internationale publikum i en åben udstilling på Arkitektskolen Aarhus.

De transparente tyndfilmkomponenter blev iscenesat under forskellige lysretninger og lysstyrker samt analyseret i de udtryk der opstår gennem lys og skyggespil, spejlinger, ornamentik og farver etc.

Gennem kreative undersøgelser med kompositionen af lukkede, åbne og transparente facadeelementer undersøgte de studerende solcellepanelernes muligheder i forskellige målestokke og kontekstuelle sammenhæng. Blandt andet blev facader af eksisterende bygninger transformeret med de nye energiproducerende byggekomponenter. Digitale kollager og fysiske modeller belyste mangfoldigheden og variationen, som panelerne åbner op for.

En del af materialet til workshoppen bestod af præsentationer fra projektets øvrige deltagere indenfor solceller, lyskvalitet – og måling samt termisk indeklima i glasbyggerier, jfr. bilag 10A-10C.

Præsentationer samt papers indgik som naturlige 'byggesten' i processen omkring arbejdet med mock-ups.

Komponenternes tekniske værdier blev kombineret med de oplevede æstetiske potentialer, hvilket udgjorde parametrene for de 6 grupper af studerende til en holistisk programmering af 6 rumstore modeller. Udgangspunkt til modellerne dannedes af en given, konstruktiv ramme på hjul, indenfor hvilken de rumlige fænomener skulle udfolde sig. Gennem præcise installationer i disse mobile rammekonstruktioner fremhævede de studerende særlige æstetiske aspekter af de transparente tyndfilmsolcellepaneler i et skalaløst, men tilgængelig rum. Alle 6 rummodeller blev senere vurderet af en tværfaglig ekspertgruppe bestående af repræsentanter fra SBI, Designskolen Kolding og Teknologisk Institut samt ved en åben kritik og udstilling med deltagelse fra erhverv, andre institutioner, medstuderende og lærere samt projektgruppen. Den umiddelbare vurdering fra såvel fagfolk som øvrige interesserede var, at projekterne var løst med stor entusiasme, dygtighed og idérighed og at workshoppen havde nået målet om at anskueliggøre hvorledes solcellepaneler kan anvendes som en æstetisk attraktiv byggekomponent.

En præsentation af de mock-ups der blev bygget som en del af workshoppen samt en beskrivelse af de lysfiltrerende solceller i den valgte kontekst, findes i afsnit 8 Evaluering af lysfiltrerende solcellepaneler samt i publikationen 'LYS+ENERGI+ARKITEKTUR – Potentialer i Transparente Solceller', som udgør bilag 11.

7. Formidling

Formidling har været en nøgleaktivitet i 'Lys og Energi-solceller i transparente facader' – formidling til andre faggrupper, til solcellebranchen inklusiv solcellefabrikanter og til byggeindustrien, som har fået bedre indsigt og dermed også større interesse i området. Særligt udfordringen omkring formidling til de studerende ved Arkitektskolen Århus har været inspirerende, spændende og berigende fordi det stiller andre formidlingskrav i forhold til at være præcis og samtidig interessant end sædvanligvis i forsknings- og udviklingsprojekter.

Workshoppen 'LYS+ENERGI+ARKITEKTUR' fungerede som en god, praktisk og konkret platform for formidling ud over at den naturligvis gav væsentlige bidrag til projektets resultater. For at kommunikere potentialet for solceller som attraktive facadeelementer, er det nødvendigt at se panelerne som netop en del af en facade. De mock-ups med solcellepaneler der blev opført på workshoppen og som blev vist frem til en offentlig udstilling, fungerede som det nødvendige bindeled mellem de enkeltstående paneler og hele facader i fuld skala.

I workshoppen deltog ca. 40 danske og udenlandske arkitektstuderende mens der til den åbne kritik og udstilling var omkring 500 gæster med interesse for solceller, lys og arkitektur.

Budskabet, eksemplerne og resultaterne har gennem hele projektet være formidlet bredt både nationalt og internationalt:

- som forelæsninger/foredrag, f.eks. "Solceller og sollys", forelæsning, Kunstakademiets Arkitektskole, 3. årgang, 26. september 2006 ved Ellen Kathrine Hansen
- på konferencer,

f.eks. "A Scandinavian perspective on light and energy for the built environment", NanoEurope / 2nd International Conference on the Industrialisation of DSC, St. Gallen, 11.-13. sept. 2007 ved Hanne Lauritzen

- i den trykte presse,
f.eks. "Fremtidens vinduer er multifunktionelle", Byggeavisen – annoncetillæg til Jyllandsposten, 11. april 2006.
- I lokal-TV,
SBS net 25. april 2008 i 4 forskellige udsendelser
- Offentlige arrangementer,
f.eks. udstilling 26. april 2008 på Store Torv, Århus i forbindelse med Forskningens Døgn, Arkitektskolen Aarhus, Teknologisk Institut, VELFAC

Alt materiale i forbindelse med workshoppen har været offentligt tilgængeligt via Arkitektskolen Aarhus' hjemmeside.

Faglige rapporter udarbejdet i projektperioden, nærværende slutrapport samt publikationen 'LYS+ENERGI+ARKITEKTUR' (bilag 11) vil desuden være tilgængeligt til download fra Arkitektskole Aarhus' hjemmeside: <http://lea.aarch.dk> som en del af formidlingsstrategien. Publikationen 'LYS+ENERGI+ARKITEKTUR' er trykt i 2300 eksemplarer og vil blive sendt ud til danske tegnestuer som inspiration til anvendelse af lysfiltrerende solceller. En oversigt over alle formidlingsaktiviteter er beskrevet i bilag 12.

Den materialesamling af solcellepaneler, der er etableret i løbet af projektet, vil fungere som eksempler på hvilke muligheder teknologien rummer og en helt konkret mulighed for såvel arkitektstuderende som praktiserende arkitekter for personligt at tage produkterne i åsyn. Dette tilbud er der allerede i projektets afsluttende fase en del tegnestuer der har haft interesse i og der er derfor udlånt paneler til tegnestuerne SKALA Arkitekter, 3XN og aart som inspiration til henholdsvis et boligbyggeri med transparente tyndfilmceller, hovedkvarteret for Deutsche Bahn i Berlin og VELFACs projekt omkring bæredygtige boliger.

8. Evaluering af lysfiltrerende solcellepaneler

Det overordnede formål med 'Lys & Energi' var at gennemføre en tværfaglig vurdering af potentialet for integration af lysfiltrerende solceller i facader, på en måde der tilfredsstiller de arkitektoniske målsætninger samtidig med at komponenten bidrager til et godt indeklima både termisk og lysteknisk samt producerer elektricitet.

I de foregående afsnit er solcellepanelerne blevet vurderet isoleret set fra forskellige faglige vinkler. I dette afsnit sammenfattes undersøgelserne af lysfiltrerende solceller fra de syv forskellige producenter enkeltvis ud fra den dertil udviklede matrixstruktur, jfr. afsnit 3 Tværfaglig indgang. I tillæg til de paneler, der blev anvendt i workshoppen, har projektgruppen haft mulighed for at vurdere en prototype på produktet 'Sphelar' på komponentniveau. Resultaterne fra 'Sphelar' indgår derfor også som en del af den samlede evaluering.

Værdierne er defineret i tværfagligt regi af forskningsprojektets parter og består af både beregninger, målinger og registreringer.

Den tekniske karakterisering af komponenterne er beskrevet ved lystransmittans gennem panelet (LT-værdien), g-værdi (solenergitransmittans), åbningsgrad og el-produktionen for de enkelte paneler.

Åbningsgrad og g-værdi af panelerne fra MSK og Würth Solar er målt og beregnet på DTU, jfr. bilag 8, mens data for de øvrige paneler er værdier oplyst af producenterne.

Belysningsstyrke, luminans og udsyn er målt og registreret på SBI, jfr. bilag 6 mens den forventede årlige strømproduktion under danske forhold er beregnet på Teknologisk Institut, jfr. bilag 4.

De arkitektoniske vurderinger af solcellefacaden og rummet er foretaget som en del af workshoppen, jfr. afsnit 6 Workshop.

I bilag 13 er vist flere billeder af de byggede mock-ups fra workshoppen 'LYS+ENERGI+ARKITEKTUR' som støtte for forståelsen af de arkitektoniske vurderinger af både facader og rum.

8.1 MSK, 'HQ PV Glass', '44 Wp' og '50 Wp'

Regulerende komponent

LYS: LT-værdi: 0,1 og 0,04

Lyset filtreres gennem tyndfilmen, samt gennem de smalle spor, der er skåret ud i tyndfilmen, se figur 8.1.

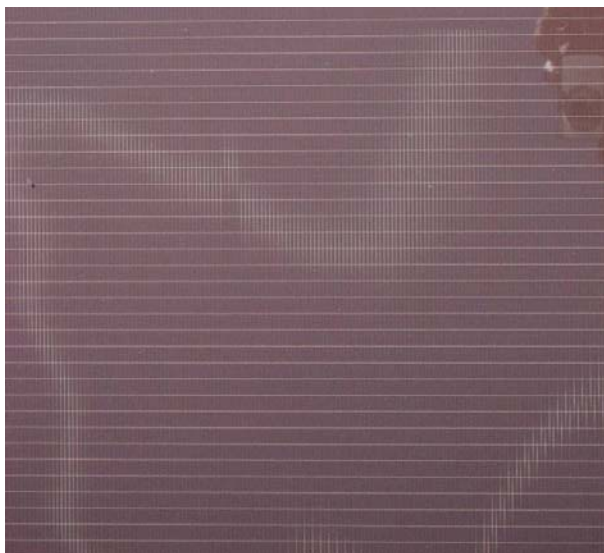
VARME: g-værdi, hvor solcellerne er placeret yderst i en lavenergirude: 0,09 og 0,7 for henholdsvis '44Wp' og '50 Wp', hvilket er meget lave værdier.

UDSYN: Åbningsgrad: 10% og 4%

Udsynet gennem komponenten er begrænset, især for panelet med den lave åbningsgrad.

Stiller man sig helt tæt på opleves en del figur/baggrund forvirring, konturer og variationer i lys kan registreres.

Farvegengivelsen af udsigten gør det svært at skelne mellem farver indenfor samme nuancer.



Figur 8.1 MSK 'HQ PV Glass 50 Wp'

Kommunikerende komponent

UDTRYK: Ydersiden af panelerne har en mørkbrun -rødlig farve, der kan harmonere med den farveskala, vi ofte i Norden benytter i byggeriet med reference til naturmaterialer som tegl og natursten. Indersiden af panelerne er hvid, hvilket medvirker, at det filtrerede lys blødes op, og fladen harmonerer med de lyse flader, der ofte benyttes i interiør. Både på yder- og indersiden er glasset meget spejlende.

LYS- OG SKYGGESPIL: Tyndfilmen er opdelt i rektangler, der måler hhv. ca. 8 x 1 mm og 8 x 2 mm, hvorimellem der er fjernet materiale. Strukturen er for lille til at den på afstand danner en ornamentering eller et mønster via lys og skyggespil. Komponenten fremstår på afstand som en homogen flade, der tegner diffuse skygger.

Producerende komponent

ELEKTRICITET: Forventet årlig strømproduktion pr. panel: 30 kWh hhv. 35 kWh

Forventet årlig strømproduktion pr. m²: 30 kWh hhv. 35 kWh, middel

Regulerende facade

FACADEOPBYGNING: I workshoppen er de to MSK komponenter monteret med en afstand til klimaskærm, der har 4 lysåbninger af varieret størrelse. Komponenterne kan bevæges vertikalt uafhængigt af hinanden, og skaber sammen med lysåbningerne et fint spil i reguleringen af lys, varme og udsyn.

Åbninger i facaden udgør 27 %.

LYS OG VARME: Lysåbningernes placering i facadens fire hjørner samt de mobile komponenter øger muligheden for at opnå et godt indeklima og et varierende lysindtag. Om sommeren kan panelerne skærme for varmen, og om vinteren kan de tillade større solindfald og derved reducere opvarmningsbehovet. Facaden er et eksempel på, hvordan komponenten regulerer lyset og farverne i rummet bl.a. via sin spejlende bagside reflekterer lyset og den røde farve fra den lukkede flade ind i rummet.

Kommunikerende facade

UDTRYK: Mock-up'en demonstrerer hvordan de mobile komponenter, sammen med den inderste facade, skaber oplevelsen af en aktiv facade, der justeres i forhold til klima, og det liv der udspilles i rummet bag facaden.

Projektet eksponerer solcellerne på en måde, så de bliver sat aktivt i spil, aktivt i dobbelt forstand da de er bevægelige, og samtidig kommunikerer, hvad der sker bag facaden. Facaden opleves som levende og interaktiv.

Producerende facade

ELEKTRICITET: Facaden er sydvendt, og kan derfor estimeres til at producere 65 kWh årligt.

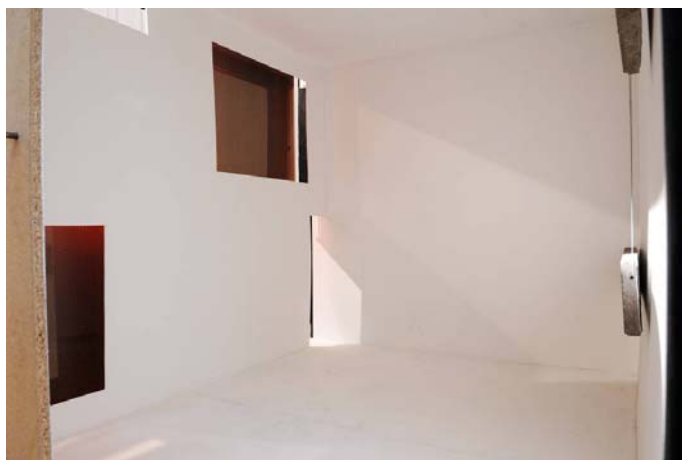
INDTRYK: Facaden producerer forskellige indtryk afhængigt af solcellernes placering. Indtrykket af dybden i facaden fremkommer via solcellernes afstand til den. Facaden fremstår levende, og udtrykker noget om det liv, der udspilles bagved.

Regulerende rum

LYS: De interaktive komponenter øger muligheden for med lys at tegne rummet forskelligt afhængigt af lysåbningens placering samt lysets filtrering gennem solcellen.

Dagslysfaktoren er mindre end 1 % i hele rummet.

VARME: De mobile komponenter giver god mulighed for at regulere solindfaldet til rummet og derved optimere energiforbrug til opvarmning og køling af rummet. Om sommeren kan der afskærmes for varmen, mens der om vinteren kan åbnes for solvarmen i dagtimerne.



UDSYN: De fire åbninger giver en rig mulighed for regulering af hvilket frie eller filtrerede udsyn, der kan skabes fra rummet.

Kommunikerende rum

UDTRYK: I projektet benyttes komponenten til at definere rummet indefra. Der skabes 3D-effekt i facaden ved at udnytte komponentens spejlende karakter i samspil med den røde facade. Rummet kommunikerer om de frie muligheder, der er for at regulere lysindtaget og udsigten.

De interaktive komponenter skaber mulighed for variationer, og aktiverer brugeren til at forme og indtage rummet på forskellig vis.

Producerende Rum

INDTRYK: De interaktive komponenter producerer en følelse af, at man selv kan forme lyset i rummet efter egne behov. Rummet udfordrer brugeren til at lege med lyset og give rummet nye former. Facaden er 3D via solcellernes afstand til den inderste facade. Det er interessant at man indefra i solcellens spejl kan se ydersiden af facaden (den røde). Derved indeholder facaden flere perceptionelle lag.

Perceptionen af lyset gennem det åbne, filteret og spejlinger samt interaktionen med brugeren af og i rummet skaber atmosfæren i rummet.

8.2 RWE Schott Solar, 'ASI-THRU'

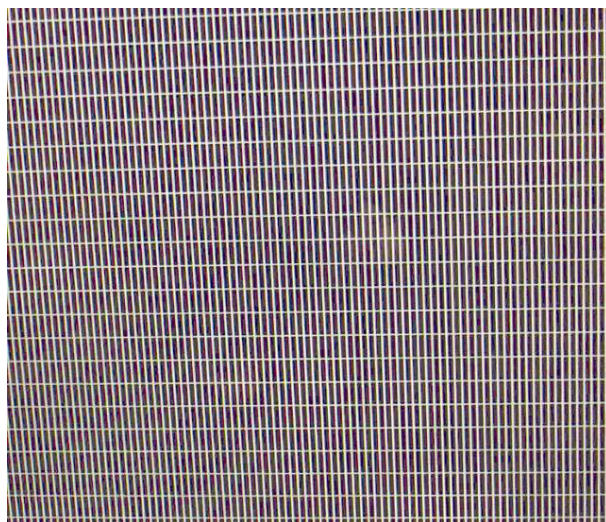
Regulerende komponent

LYS: Lyset transmitteres gennem den lysfiltrerende tyndfilm samt gennem de smalle transparente spor, der er skåret ud i filmen, se figur 8.2.

VARME: g-værdi, hvor solcellerne er placeret yderst i en lavenergirude: 0,1, hvilket er en meget lav g-værdi

UDSYN: Åbningsgrad: 10%

Udsynet gennem komponenten er begrænset af de små rektangulære PV-strimler, og placerer man sig helt tæt på, vil der opstå en del forvirring med hensyn til figur/baggrund.
Figur 8.2. RWE Schott Solar 'ASI-THRU'



Kommunikerende komponent

UDTRYK: Ydersiden af panelerne har en mørkbrun -rødlig farve, der harmonerer med den farveskala, der ofte benyttes i byggeriet med reference til naturmaterialer.

Indersiden af komponenten er en reflekterende, blank, lys, grå overflade, hvilket medvirker, at det filtrerede lys blødes op, og fladen harmonerer med lyst interiør. Både på yder- og inderside har glasset en spejlende effekt. Tyndfilmen er opdelt i rektangler (ca. 18 x 5 mm) via de transparente spor (ca. 0,5 mm), disse opdelinger er større end i panelerne fra MSK og GSK/Isolar (afsnit 8.1 og 8.3).

LYS- OG SKYGGESPIL: Ved observationer nær komponenten er lys- og skyggetegning tydeligere end for panelerne fra MSK og GSK/Isolar, da celleopdelingen er større. En ornamentering fremkaldes i skyggetegningen. På afstand kan der ikke registreres skyggetegning, idet panelet fremstår reflekterende og homogen.

Producerende komponent

ELEKTRICITET: Forventet årlig strømproduktion pr. panel: 20 kWh. Forventet årlig strømproduktion pr. m²: 30 kWh

INDTRYK: Oplevelsen af lysets variation er meget stærk i denne komponent. Afhængigt af lyskildens placering skifter komponenten karakter, hvilket skaber et interessant lys/skyggespil.

Regulerende facade

FACADEOPBYGNING: Komponenten indgår i en facadekomposition af åbne, lukkede og filtrerende komponenter. Vestfacaden består af to solcellekomponenter og et lukket panel. De tre paneler kan bevæges vertikalt, og kan uafhængigt af hinanden skifte position i facaden. Mod øst er en enkelt komponent inkorporeret sammen med en lukket facade.

LYS OG VARME: Denne facadeløsning giver en fleksibel løsning for regulering af lys og varme, da lys- og varmeindtag kan reguleres fra helt åbne facadeelementer over filtret til de lukkede partier. Herved fungerer solcellepanelerne som såvel solafskærmende som arkitektoniske elementer, der regulerer facaden efter brugernes ønsker.

Kommunikerende facade

UDTRYK: De mobile semi-transparente komponenter understreger oplevelsen af facaden som åben, lukket og transparent. Projektet eksponerer solcellerne på en måde, så de bliver sat aktivt i spil, da de er bevægelige, og samtidig kommunikerer, hvad der sker bag facaden.

Der arbejdes med flere lag, hvilket giver mulighed for at filtrere lyset igennem to lag filtre. På denne måde kommunikerer facaden om solcellepanelerne ikke som et vindue, men som et ekstra lag, der kan være med til at skabe nye facadeudtryk.

Producerende facade

ELEKTRICITET: Energiproduktionen er reduceret pga. solcellernes øst-vest orientering. Facaden kan derfor estimeres til at producere omkring 60 kWh årligt, når alle paneler er eksponerede. En reduktion i energiproduktionen kan forventes, når de mobile komponenter er placeret udenpå hinanden.

INDTRYK: Facaden producerer indtryk, der afhænger af hvordan solcellerne er placeret. De velproportionerede opdelinger i facaden samt det præcist definerede felt til solcellerne giver indtryk af ro og harmoni med reference til 'japansk arkitektur'.

Regulerende rum

LYS: Lysindtaget kan reguleres vertikalt, hvilket giver mulighed for stor variation i, hvor langt lyset kommer ind i rummet. Samtidig er der mulighed for helt af blænde af for lyset i åbningen.

Dagslysfaktoren er mindre end 1 % i hele rummet.



VARME: De mobile komponenter giver god mulighed for at regulere solindfaldet i rummet og derved optimere energiforbrug til opvarmning og køling af rummet. Om sommeren kan der afskærmes for varmen, mens der om vinteren kan åbnes for solvarmen i dagtimerne.

UDSYN: Den vertikale regulering af udsyn giver gode muligheder for regulering af udsyn i forhold til øjenhøjde eller ønske om at indramme en bestemt udsigt.

Kommunikerende rum

UDTRYK: Rummet er bygget op omkring den sorte rammekonstruktion med hvide vægge imellem. Rammerne er synlige indvendigt, og fungerer som karm for solcellepanelerne, hvilket giver et harmonisk og stilrent udtryk i rummet med reference til japansk arkitektur.

LYS- OG SKYGGESPIL: De lysregulerende solcellekomponenter sammenstillet med at de to lysåbninger, er placeret forskudt for hinanden i de to langsider. Det tegner et behageligt og roligt rum. Men også et rum der er foranderligt. Det diffuse lys skaber en neutral stemning, der brydes af det mere karakterfyldte 'indrammede' lys.

Producerende rum

INDTRYK: Spejlingerne i panelerne bruges aktivt til at udtrykke såvel et visuelt/oplevet rum som et fysisk rum. Spejlene/solcellerne guider/kommunikerer hvordan man bevæger sig i rummet, som perceptionelt ændrer karakter, alt efter hvor i rummet man befinder sig. På trods af at spejlene 'snyder' rumligt, opleves rummet som ekspressivt men også behageligt og roligt. Det er som om, spejlene er med at udvide rummet, uden at de ophæver rummets beskyttende og definerede fysik.

8.3 GSK/Isolar, 'VOLTARLUX'

Regulerende komponent

Lyset transmitteres gennem den lysfiltrerende tyndfilm samt gennem de smalle transparente spor, der er skåret ud i filmen, se figur 8.3.

VARME: g-værdi, hvor solcellerne er placeret yderst i en lavenergirude: 0,15, hvilket er en meget lav g-værdi

UDSYN: Åbningsgrad: 20 %

Udsynet gennem komponenten er hæmmet, og placerer man sig helt tæt på, vil der opstå en del figur/baggrund forvirring. Farvegengivelsen gør det svært at skelne mellem farverne grå og armygrøn samt blå og grå-blå.

Figur 8.3 GSK/Isolar 'VOLATRLUX'



Kommunikerende komponent

UDTRYK: Panelet er sort på ydersiden og lysegrå på indersiden. Tyndfilmen er opdelt i rektangler (ca. 16,5 x 3 mm). Strukturen er meget finmasket, og opleves derfor kun når man er tæt på, hvorimod den på afstand opleves som en homogen flade. Ornamenteringen er neutral af udtryk. Glasset har en spejlende karakter.

LYS OG SKYGGESPIL: Strukturen er for finmasket til at der opstår visuelle skyggevirkninger i komponenten. Komponenten fremstår som en homogen flade, der tegner diffuse skygger.

Producerende komponent

ELEKTRICITET: Forventet årlig strømproduktion pr. panel: 30 kWh. Forventet årlig strømproduktion pr. m²: 15 kWh

INDTRYK: Panelerne giver indtryk af at være nemt at integrere i en facade, hvor dets lysfiltrerende og reflekterende karakter kunne bidrage til bygningens arkitektoniske udtryk.

Regulerende facade

FACADEOPBYGNING: Mock-up'en er beklædt med hvide lysfiltrerende materialer. Solcellen udgør et af disse lag.

LYS: LT-værdien for facaden er ikke målt, men vil være højere end solcellens, da den lysfiltrerende facadebeklædning transmitterer mere lys ind i rummet end solcellen. Solcellen er stationær, og blokerer for lys- og varmeindtag via sit filter. I dobbeltfacaden mellem solcellen og det lysfiltrerende materiale kan der placeres andre materialer, derved kan lys- og til dels varmeindtag reguleres.

VARME: Komponenten vil reducere solindfaldet til rummet og derved reducere et evt. kølebehov om sommeren.

UDSYN: Der er intet udsyn, idet de øvrige facader er beklædt med et ikke transparent materiale

Kommunikerende facade

UDTRYK: Mock-up'en demonstrerer, hvordan solcellefilteret i en helt lysfiltrerende facade fremstår som den mørke solafskærmende komponent, der via skyggerne skaber effekter.

Set udefra har komponenten en effekt i sin transparente karakter, men stærkest virker den spejlende karakter, der reflekterer omgivelserne og derved skaber interferens.

Rummet/facaden vil udefra fremstå interessant i spillet mellem dag/nat situationer, da det om natten vil oplyse kontekst. Der kan fremkomme interessante skyggevirkninger indefra projiceret op på facaden.

Producerende facade

ELEKTRICITET: Facaden i mock-up'en er sydvendt, og kan estimeres til samlet at producere 30 kWh årligt.

INDTRYK: Udefra fremstår solcellekomponenten som det mørke parti i facaden. Der er meget lidt kontakt gennem panelet, til det der udspilles indenfor. Indefra fremstår facaden let og diffus, det er svært at bedømme dybden i den dobbelte facade.

Regulerende rum

LYS: Solcellekomponenten skaber sammen med det lysfiltrerende facademateriale et diffust lysindtag fra alle fire sider, og skaber et lyst rum med spredt lys og få skygger. Der kan forekomme blænding. Der er ingen mulighed for regulering af lyset.



Dagslysfaktoren er lidt højere end 1 % lige indenfor vinduet, mens resterende del af rummet er dagslysfaktoren under 1 %

VARME: Komponenten er i denne løsning med til at regulere solens indfald til rummet og reducerer derved kølebehovet og overophedningsrisikoen i rummet, men øger opvarmningsbehovet. Løsningen mangler mulighed for regulering af lys- og varmeindtag.

UDSYN: Der er ikke udsyn.

Kommunikerende rum

UDTRYK: Dette rum fremstår helt anderledes, end rum man normalt oplever, da der udelukkende er arbejdet med det translucente lys i mock-up'ens fire facader. Solcellen er ubetydelig for oplevelsen af lyset i rummet. Der er ingen kontakt mellem inde og ude.

LYS OG SKYGGESPIL: Det er svært at definere rummets afgrænsning, da lyset er meget diffust. Tekstur forsvinder.

Producerende rum

INDTRYK: Det er svært at få indtryk af rummets afgrænsning, da lyset er meget diffust. Tekstur og detaljer forsvinder, og opmærksomheden henledes på nuancerne i de skyggekastninger, der skabes fra solcellen og kontekst, som skyerne der går for solen, slagskygger fra forbipasserende eller fra andre bygninger. Rummet producerer en følelse af meditativ koncentration, en afslappet atmosfære, hvor brugeren ikke bliver forstyrret af udefra kommende indtryk. Det er et introvert rum, der egner sig til funktioner, der kræver ro og ensartet lys for at sindet bringes væk fra tid og sted.

8.4 Würth Solar, 'WSS0007', 'WSS0008', 'WSS0009'

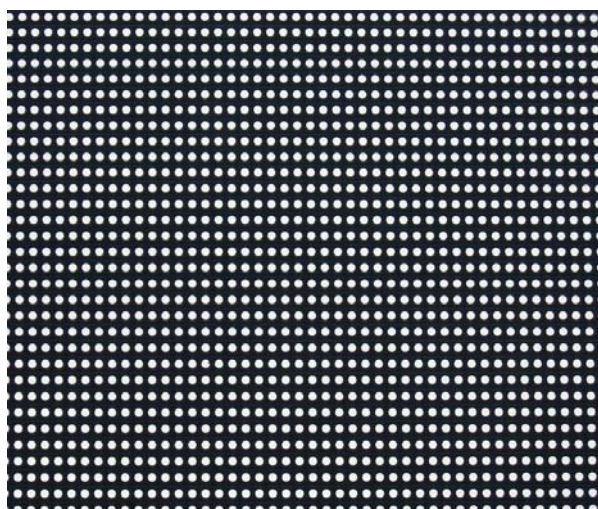
Regulerende komponent

LYS: LT-værdi: 0,16 for 'WSS0007', 0,15 for 'WSS0008' og 0,06 for 'WSS0009'

VARME: g-værdi, hvor solcellerne er placeret yderst i en lavenergirude: 0,09, 0,15 og 0,16 for henholdsvis 'WSS0007', 'WSS0008' og 'WSS0009', hvilket er meget lavt

UDSYN: Åbningsgrad: 8% , 21% og 22%

De små huller i panelerne er med til at reducere udsynet og skabe forvirring med hensyn til figur/baggrund, når man placerer sig helt tæt på. Farvegengivelsen igennem panelerne er tydeligst i panelet med de største huller.



Figur 8.4 Würth Solar 'WSS0008'

Kommunikerende komponent

UDTRYK: Würth Solar panelerne er sort og blankt på ydersiden og sølvspejlende på indersiden. Små cirkulære transparente huller (diameter ca. 2,5-3,5 mm) i det 100 % lysblokerende solcellemateriale tegner linier i panelet mellem tynde tråde, de elektriske ledere. Panelerne

fremstår ekspressive med en high-tech karakter fremkaldt af de sorte og spejlende flader samt de regulære hulmønstre. De tre komponenter har forskellige størrelser huller, og derved forskellig transparens og lystransmittans.

LYS OG SKYGGESPIL: Lyset filtreres udelukkende igennem de transparente cirkulære huller, hvilket fremkalder et karakterfuldt og kontrastfuldt lys og skyggespil. Komponenten har på såvel yder- som inderside en spejlende karakter, der er stærkest, når panelet ses fra siden. Transparensen øges derimod ved mere frontal fokus.

Producerende komponent

ELEKTRICITET: Forventet årlig strømproduktion pr. panel: 45 kWh, 30 kWh og 25 kWh for henholdsvis 'WSS0007', 'WSS0008' og 'WSS0009'

Forventet årlig strømproduktion pr. m²: 60 kWh, 40 kWh og 35 kWh

INDTRYK: Panelerne opleves fascinerende stramme og kontrastfulde i materialer og lysindfald, hvilket også udfordrer til at bruge de muligheder, der ligger i at arbejde med spejlinger og refleksioner projiceret over hulmønstret.

Regulerende facade

FACADEOPBYGNING: Tre komponenter er placeret over hinanden i mock-up'ens to langsider mod øst og vest, hvor de udgør et felt, der spænder fra gulv til loft. I facaden mod syd findes vertikale skråtstillede lameller, der ligeledes spænder fra gulv til loft.

LYS OG UDSYN: Panelet med lavest lystransmittans er placeret øverst, hvilket reducerer blænding fra himmellys og direkte sollys, hvor det oftest kan give gene. Samtidig lukker facaden yderligere for udsyn til omgivelserne, hvilket medfører, at udsynet fra de lodrette lameller i sydfacaden fremstår mere markant. Lamellerne kunne med fordel udføres, så de kan justeres efter dagslys-forholdene. Ved siden af komponenterne er der placeret 12 skydelåger, der regulerer lys, ventilation og udsyn.

Kommunikerende facade

UDTRYK: De sorte solcellekomponenter fremstår udefra mørke og om dagen lukkede, og kan med fordel, som i mock-up'en, integreres i en facade med andre mørke komponenter. Om aftenen vil komponenterne blive gennemlyst indefra med stor effekt.

Producerende facade

ELEKTRICITET: Var de solcelleintegrerede facader sydvendt, ville de producere 100 kWh årligt. Idet de vender øst-vest, forventes de at producere 74 kWh årligt.

INDTRYK: Facaden skaber et indtryk af teknologisk kølig elegance gennem de sorte blanke solcellekomponenter i den sorte facade.

Regulerende rum

LYS: Dagslysfaktoren er lidt højere end 1 % lige indenfor vinduet med panelerne med des tørste åbningsgrader, mens den resterende del af rummet har en dagslysfaktor under 1 %. For panelet med de mindste åbninger, er dagslysfaktoren mindre end 1 % i hele rummet.

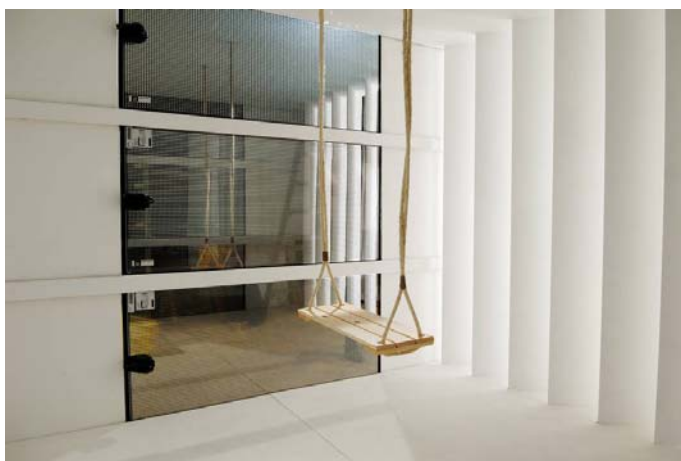
VARME: Komponenterne vil reducere solindfaldet, og derved reducere et evt. kølebehov om sommeren, men de vil også reducere solindfaldet om vinteren og dermed forøge opvarmningsbehovet.

UDSYN: Solcellekomponenterne kan skydes til siden og give frit udsyn. I spejlingerne i den østvendte facade er der udsyn mod vest mellem lamellerne. Effekten heraf er ekstra stor ved solnedgang.

Kommunikerende rum

UDTRYK: Panelerne fra Würth Solar syner som et meget markant og interessant element i rummet. Der er skabt et stramt, men poetisk rum. Lysindtaget fra tre sider er behageligt. Samtidig er der en spænding i rummet, der skabes via de modstående, spejlende solceller, der udvider rummet visuelt/perceptionelt på tværs. Spejlingen af lamellerne i solcellepanelerne skaber mod øst oplevelser af åbenhed og udsigt, mens lamellerne i de vestvendte solceller spejles som lysninger, der graduerer dagslysindtaget, uden mulighed for udsyn.

Dette er et godt eksempel på, hvordan solcellekomponenter kan skabe effekter med rumlighed, lysindtag, forhold inde/ude og spejlinger. Hele rumoplevelsen understreges ved at benytte den ophængte gynge.



Producerende rum

INDTRYK: Komponenterne lukker for udsyn, men åbner for et visuelt rum via panelernes spejlinger, som skaber et uendeligt rum på tværs af det fysiske rum. Samtidig understreges mulighederne i de forskellige oplevelser mellem inde/ude og forskellige lysindtag/refleksioner. Rummet skærper vores sanser, og løfter os ud af en fast fysisk forståelse af virkeligheden – en let og dynamisk atmosfære, hvor individet er i spil, og det er kroppens placering og øjnenes fokusering, der skaber rummet.

8.5 PhotoSolar, 'PowerShade'

'PowerShade' er et lysfiltrerende solcellepanel der er opbygget efter samme design som 'MicroShade', der er et passivt produkt til solafskærmning – blot belagt med amorf silicium (solcellemateriale) I workshoppen er der arbejdet med det passive 'MicroShade'.

Regulerende komponent

LYS: LT-værdi: 0,31. 'PowerShade' har høj lystranmittans, men for at give nok dagslysindtag for almindelige rum kræves større solcelleareal eller suppleret med traditionelle ruder.



Figur 8.5 PhotoSolar 'PowerShade'

Lysmålinger viser, at der kan forekomme blænding og visuel diskomfort, hvilket kræver yderligere afskærmning.

VARME: g-værdi hvor solcellerne er placeret yderst i en lavenergirude: 0,09-0,23. g-værdien afhænger af solhøjden og dermed af årstiden, lavest om sommeren og højest om vinteren. g-værdien varierer således mellem meget lav og meget høj.

UDSYN: Åbningsgrad: 45 %, høj. Den horisontale struktur i solcellerne kan forekomme generende, da den fremstår markant. Er bedst egnet til udsigt med en fjern horisont. Farvegengivelsen af udsigten er god.

Kommunikerende komponent

UDTRYK: 'PowerShade' er bygget op af horisontale striber af transparente solceller med klare smalle striber imellem. Solcellerne er perforerede med vinklede mikro-huller, som skaber det transparente udseende, og skærmer for det høje lys. Mønsteret er defineret ud fra komponentens effektivitet. Komponentens udseende kommunikerer om dens funktion som solcelle og afskærmning. Den horisontale opstribning opleves dominerende, da den er meget retningsgivende.

LYS OG SKYGGESPIL: De vinklede mikrohuller afskærmer for det høje himmellys. Derved er lysindtaget meget påvirket af, hvilken kontekst der er overfor, hvorfra lyset reflekteres ind i rummet. Opstribningen tegner et meget markant skyggemønster.

Producerende komponent

ELEKTRICITET: Ydelsen pr. panel kan ikke gives da der ikke findes standard panelstørrelse. PowerShade paneler fremstilles altid efter mål.

Forventet årlig strømproduktion pr. m²: 44 kWh Disse tal er estimeret da komponenten er under udvikling, og dette panel endnu ikke producerer elektricitet.

INDTRYK: Den horisontale opstribning giver indtryk af en stram ornamentik. Denne opvejes dog af, at panelerne er meget transparente og derved opleves lette og med et blødt lysindfald i kombinationen mellem de lysfiltrerende solcellebånd og de transparente mellemrum.

Regulerende facade

FACADEOPBYGNING: Gruppen udviklede en alternativ mere retningsløst solcellestruktur. De to komponenter er monteret i hver sin modstående facade i mock-up'en, herved sammenlignes hvordan de to strukturer påvirker rummet.

LYS: Komponentens vinkelselektivitet reducerer transmittansen af det høje direkte sollys men reducerer også himmellysindtaget, hvilket er et problem, når det er overskyet. Der er ingen regulering af lyset i facadeopbygningen, solafskærmning vil være nødvendig, især ved lavere solvinkler.

VARME: Komponentens har en vinkelselektiv g-værdi, hvilket betyder, at den om sommeren vil reducere kølebehovet samtidig med, at komponenten vil lukke mere sol ind om vinteren og derved forøge opvarmningen.

UDSYN: Det retningsløse mønster giver færre figurforstyrrelser.

Kommunikerende facade

UDTRYK: Facaden kommunikerer om et lysfiltrerende filter, der er placeret som en visuel ornamentering mellem ude og inde. Udefra giver lysets spil i solcellefacaden et liv i facaden og en let ornamentering, der kan fremstå mere imødekomende end traditionelle glasfacader.

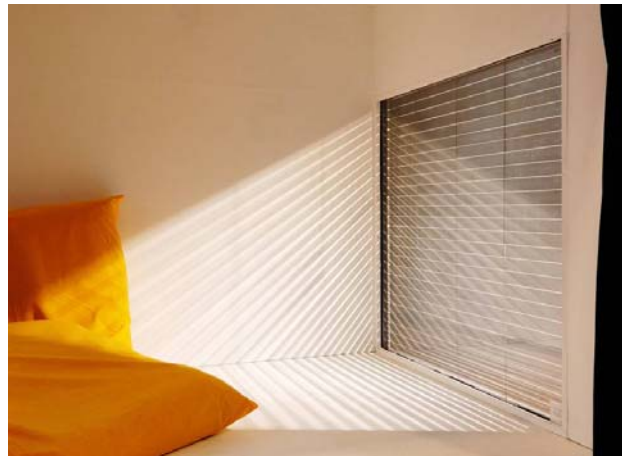
Producerende facade

ELEKTRICITET: Energiproduktionen er reduceret pga. øst-vest orienteringen. Det udviklede mønster har samme solcelleareal og transmittans og derfor i teorien den samme ydelse som det originale 'PowerShade' panel, 44 kWh pr m². Med reduktion for at de er øst og vestvendte svarende til 25 kWh pr m²

INDTRYK: En højteknologisk facade med æstetiske potentialer, da der er en fin balance i kontakten mellem inde og ude, ornamentet og rummet.

Regulerende rum

LYS OG VARME: 'PowerShade' har en indbygget årstidsregulerende effekt på solindfaldet, vinkelselektiviteten, der skærmer for en stor del af solindfaldet om sommeren, men tillader mere solvarme at trænge ind i rummet om vinteren. Man kan derfor opnå reduktion af overophedningsproblemer og kølebehov, uden at det medfører øget opvarmningsbehov. Dagslysfaktoren er lidt højere end 1 % lige indenfor vinduet, mens den resterende del af rummet har en dagslysfaktor på under 1%.



Kommunikerende rum

UDTRYK: I dette projekt har gruppen arbejdet med solcellernes udformning for at fremkalde en anden ornamentering af rummets lys end det, det originale horisontalt opdelt panel fremkalder.

LYS- OG SKYGGESPIL: Lys- og skyggespil bliver en ornamentering i rummet. Skyggetegningerne har et ekspressivt og præcist udtryk, som tegnes smukt i rummet, og angiver en fin struktur og behagelig skala men også et dominerende element for rummets karakter.

Producerende rum

INDTRYK: Lys og skyggespil fra solcellekomponenten skaber et rum, hvor man har lyst til at 'slå sig ned'. Den store gule pude, der er placeret på gulvet i rummet, indikerer fint den stemning, der opstår med de bløde skyggetegninger. Solcellekomponenterne formidler en kontakt med omgivelserne, og på samme tid afskærmer de tilpas meget til at skabe fornemmelsen af rum og privathed. Tæt på solcelleruden kan lyset opleves blændende, men inde i rummet skaber skyggespillet en atmosfære, der på en gang er dynamisk og roligt samt meget karakterfuld. De karakterfulde lys- og skyggetegninger giver indtryk af forskellige 'lysrum' i rummet.

8.6 Gaia Solar, Siliciumwafers i rude

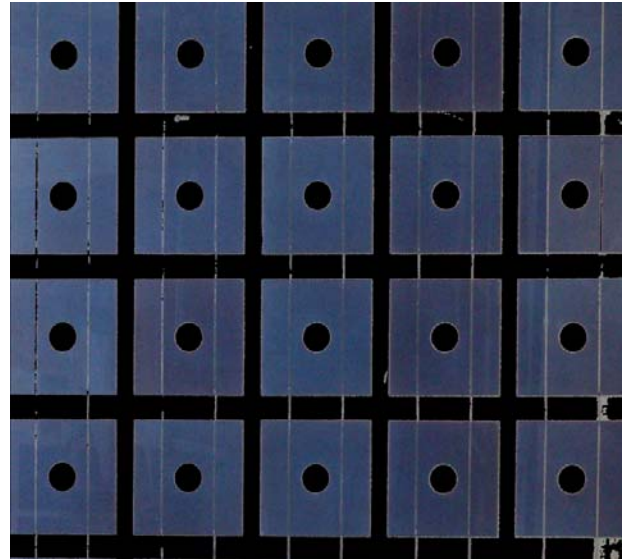
Regulerende komponent

LYS: LT-værdi: 0,22, høj

Lyset transmitteres gennem ruden, mellem de lysblokerende siliciumwafers. Der er ingen lysfiltrerende elementer i komponenten, hvorfor der opstår store kontraster mellem de mørke solceller og de transparente felter imellem disse.

VARME: g-værdi, hvor solcellerne er placeret yderst i en lavenergirude: 0,23, hvilket er lavt.

UDSYN: Åbningsgrad: 34%. Udsynet gennem komponenten er begrænset af de kvadratiske siliciumwafers, der tegner en markant struktur. Men tæt på ruden opleves direkte udsyn igennem glasset imellem solcellerne. Farvegengivelsen af udsigten gennem det klare glas er god.



Figur 8.6 Gaia Solar, siliciumwafers

Kommunikerende komponent

UDTRYK: Solcellerne er klassiske blå polykrystallinske siliciumceller.

Komponentens udtryk fremkommer af solcellernes kvadrater (15,5 x 15,5 cm) der er placeret i et regulært mønster med et mellemrum. I et af panelerne er der udskåret en cirkel i solcellerne, hvilket gør komponenten mere transparent, se figur 8.6.

LYS OG SKYGGESPIL: Traditionelt er denne type siliciumwafers lamineret imellem to laminerede ruder, der udgør det yderste lag i en rudekonstruktion. I denne komponent er solcellen fastgjort på én rude, nemlig på ydersiden af den inderste rude i en traditionel 2-lags rude. Ud over det materialebesparende i denne konstruktion, skabes der en interessant refleksion af solcellerne mod det yderste lag glas set indefra. Dette betyder, at komponenten får et interessant 3D-udtryk.

Producerende komponent

ELEKTRICITET: Forventet årlig strømproduktion pr. panel: 100 kWh, høj. Forventet årlig strømproduktion pr. m²: 65 kWh, høj

INDTRYK: Disse traditionelle siliciumwafers med relativt store solceller har i skala, ornamentering samt udvendig farve en meget dominerende karakter, der efterlader et indtryk af en komponent, der er fremmed som bygningskomponent og styrende for rummet.

Regulerende facade

FACADEOPBYGNING: Gruppen har arbejdet med en skærm der er udformet som det negative mønster af solcelleruden. Ved at placere skærmen et stykke inde i rummet reflekteres lyset ind i rummet, og det vil, afhængigt af brugerens placering, være muligt at se ud.

LYS: Skærmen kan i et begrænset omfang interagere med såvel lys og skygge som varme og udsyn. Skærmen kunne være mobil samt transparent, og derved også regulere fordelingen af lyset.

VARME: Komponenten reducerer solindfaldet til rummet, og reducerer derved overophedning og kølebehov. Afhængig af bevægeligheden af den negative skærm vil denne også i vinterhalvåret afskærme for solindfaldet og derved medvirke til øget opvarmningsbehov. Skærmen skal helst placeres udvendigt.

Kommunikerende facade

UDTRYK: Facadeudtrykket er meget domineret af de blå solceller, deres størrelse og struktur. De transparente felter mellem cellerne udtrykker gennemsyn, spænding og kontakt til det liv, der udspilles indenfor. De traditionelle solceller såvel som de elektriske ledere er let genkendelige, og kommunikerer, at her produceres energi.

Producerende facade

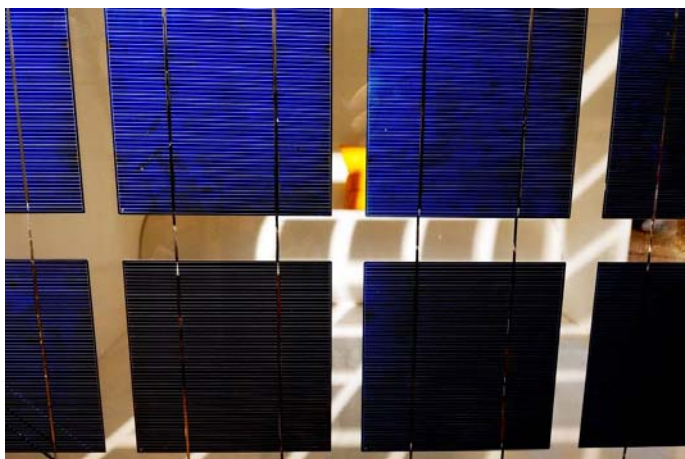
ELEKTRICITET:

Komponenten er placeret i den sydvendte facade, og kan estimeres til at producere 100 kWh årligt.

INDTRYK: Facaden producerer et indtryk af noget meget stringent og teknologisk. Der fremkommer en del interessante spejlinger i strukturen, bl.a. via de to lag glas.

Regulerende rum

LYS: Løsningen med de indvendige skærme reducerer lysindtaget og vil derfor reducere kølingsbehovet og risikoen for overophedning. Skyggetegningerne er tæt på facaden meget præcise, længere inde i rummet bliver de mere diffuse. Da de mange 'mellemrum' fungerer som enkelte lyskilder, vil refleksioner fra solcellerne i det yderste lag glas sprede lyset i rummet. Dagslysfaktoren er lidt mindre end 2 % lige indenfor vinduet, mens den resterende del af rummet har en dagslysfaktor under 1 %.



VARME: Komponenten reducerer solindfaldet til rummet og derved reduceres overophedningsproblemer og rummets kølebehov, men samtidig øges rummets opvarmningsbehov. Den regulerende skærm kunne med fordel placeres udvendigt.

UDSYN: Skærmen reducerer udsynet betydeligt.

Kommunikerende rum

UDTRYK: I projektet sammenstilles komponenten med skærme, således kan de sammen interagere med lys- og skyggevirkningen og skabe et helt specielt rumligt udtryk. Herudover er der arbejdet med rummets form, idet den modstående væg samt loft og gulv fremstår som én kurvet sammenhængende form. Denne form bliver udtryksfuld, når de regulære skygger tegner sig blødt på bagvæggen.

Skærmene bløder meget op for lyset, og skaber differentierede skyggevirkninger og smukke formtegninger i mødet mellem de hårde og bløde former. Afstanden mellem facade og filter skaber

interessante refleksioner af lyset og muligheder for udkig, uden det direkte dagslys transmitteres ind i rummet.

Producerende rum

INDTRYK: Rummet har en introvert atmosfære, der giver mulighed for ro og fordybelse. Lys- og skyggespillet er et stærk element i rummet. Foranderligheden i dette og det dragende i de præcist formede skyggers vandring over de organiske former skaber et stærkt indtryk. Rummet fremhæver foranderligheden og dynamikken i dagslysets uendelig mange karakterer.

8.7 Kyosemi corp., 'Sphelar'

Regulerende komponent

LYS: LT-værdi: 0,3-0,4

Lyset transmitteres gennem den transparente silikonefilm mellem de kugleformede solceller.

VARME: g-værdi hvor solcellerne er placeret yderst i en lavenergirude: ca. 0,35, hvilket er i den lavere ende af g-værdier for ruder. En mere præcis værdi kræver en specifik måling og beregning.

UDSYN: Åbningsgrad: 58 %

Udsynet gennem komponenten er stort set uhindret.



Figur 8.7 Siliciumkugler i silikonefilm

Kommunikerende komponent

UDTRYK: Komponenten består af små, sorte, kugleformede solceller i en transparent film. De enkelte solceller er 1,8 mm i diameter med 3,3 mm imellem hver kugle. Der er 16 500 kugler pr. m². Strukturen er meget finmasket og opleves derfor kun når man er tæt på, hvorimod den på afstand opleves som en næsten homogen flade. Ornamenteringen er neutral af udtryk.

LYS OG SKYGGESPIL

Panelet er semi-transparent og lukker direkte lys igennem den transparente indkapsling mellem de kugleformede solceller. Skyggeaftegning af panelets særlige design ses kun tæt på vinduet, men ikke længere inde i rummet.

Producerende komponent

ELEKTRICITET:

Forventet årlig strøm produktion pr. panel: 7 kWh

Forventet årlig strøm produktion pr. m²: 24 kWh

INDTRYK: Panelet fremstår meget transparent og opleves derved let med et blødt lysindfald. I sammenligning med panelet fra Gaia Solar med siliciumwafer er skalaen af de lysblokerende siliciumkugler meget mindre dominerende og opfattes umiddelbart oplagt som bygningskomponent.

En af de væsentligste konklusioner omkring lysfiltrerende solceller er, at panelerne skal ses i et større perspektiv – i en egentlig kontekst – for at kunne vurderes. Det giver således ikke mening alene at se på det nøgne solcellepanel, da de termiske, lystekniske og særligt arkitektoniske konsekvenser og potentialer af lysfiltrerende solcellepaneler kun giver mening at vurdere for en facade. Paneler der måske fremstår mindre attraktive som enkelt-elementer, får helt andre kvaliteter, når de integreres i en facade – den platform som hele dette projekt er bygget op omkring.

Den væsentligste begrænsning for arkitektonisk integration er, at panelerne ligger i faste mål og derfor i vid udstrækning bliver en hæmsko i forhold til en kreativ proces. Desværre er den nuværende situation på solcellemarkedet, at efterspørgslen er så stor at alle produkter kan afsættes stort set uanset udformning, så incitamentet til at holde fokus på design og arkitektur er lille.

Skala har også vist sig at være en udfordring i forhold til mønstringen af panelerne. Hvis der skal transmitteres en fornuftig mængde lys gennem panelet og der skal være mulighed for udsyn og god billeddannelse, er ingen af de paneler der er undersøgt i projektet tilstrækkelig lysfiltrerende til at skærme lyset af hele året under danske forhold og skal suppleres med indvendige afskærmninger.

I arbejdet med lysfiltrerende solcellepaneler, har der vist sig en del nye potentialer og udfordringer, som ikke adresseres særlig ofte i solcelleverdenen, bl.a. de spejlende effekter nogle paneler har på bagsiden.

Spejlinger fra panelernes inderside er en stor udfordring, både på godt og ondt, da de forskellige paneler har forskellige udtryk og hvor spejleffekten kan bruges meget effektivt som et arkitektonisk potentiale til f.eks. at skabe spændende rumlige effekter indenfor i bygningen, men kan samtidig medføre gener i forhold til f.eks. genskin og blænding.

Panelernes lysfiltrerende beskaffenhed åbner op for nye muligheder i facadedesign. Det transparente solcellepanel kan imidlertid ikke stå alene som den eneste lyskilde da både mængde og kvalitet af det lys der transmitteres gennem panelerne ind i rummet oftest er så begrænset at supplerende elektrisk lys er nødvendigt en stor del af året. Desuden hindrer langt de fleste af panelerne udsynet indefra og panelernes mønstring begrænser at farver indenfor samme nuance er svære at skelne og der kan opstå forvrængning af billeddannelse/ konturer.

En kombination sammensat af åbne og lukkede felter har imidlertid stort potentiale. Et hovedmål i projektet har netop været at tænke filtret som en del af arkitekturen i stedet for som en erstatning for vinduer.

En arkitektonisk-æstetisk sidegevinst er panelernes kunstlysfiltrerende egenskaber om natten. Facadeudtrykket i glas med lysfiltrerende solceller er spændende, da lyset fra rummet stråles ud i byrummet og formidler livet og aktiviteterne inden i bygningen og samtidig opleves eksponeringen mindre end hvis det var rene glaspartier.

Det anbefales at man i en kommende vurdering af solcellers lysfiltrerende potentialer tager sig bedre tid til at opleve de rum der etableres/bygges, bl.a. i flere dagslyssituationer – solskin kontra overskyet, samt at målinger og vurderinger foretages over en længere periode for at få et bedre samlet indtryk af facaderne.

9. Konklusion

Målsætningen med projektet har været at lave en tværfaglig vurdering af potentialer og udfordringer ved anvendelse af lysfiltrerende solcellepaneler som multifunktionelt byggeelement.

Projektet er blevet gennemført som et reelt tværfagligt samarbejde, hvor de forskellige faglige discipliner er blevet sidestillet og sammenholdt løbende for at opnå bedst mulige resultater i projektet. Denne tilgang har været særdeles interessant og udfordrende og har bidraget til at en større indsigt og forståelse for hinandens faglighed, hvilket er forudsætningen for en succesfuld arbejdsproces. Dette er en vigtig konklusion i forhold til fremtidig bygningsintegration af specialiserede, tekniske installationer som lysfiltrerende solcellepaneler.

For at kunne lave en vurdering af lysfiltrerende solcellepanelers potentialer og begrænsninger som multifunktionelt bygningselement, er det nødvendigt at se panelerne integreret i en større kontekst. De arkitektoniske, termiske og lystekniske vurderinger, simuleringer og målinger er derfor udført for enten en facade eller det bagvedliggende rum.

En væsentlig pointe omkring lysfiltrerende solcellepaneler generelt er, at designet – både designet af panelet og design af det mønster som skaber lysgennemgang – har stor betydning for hvordan panelet bør og kan udnyttes til at skabe velfungerende facader. Størrelsen, formen og farven af panelet har stor betydning i forhold til facadens komposition, mens også størrelsen af panelets mønstring – dvs. størrelsen af de transparente, translucente og lysblokerende felter – har vist sig at have stor betydning for såvel lysindfald, udsyn, elproduktion og evnen til at kunne regulere det termiske indeklima. De rent arkitektoniske vurderinger af panelerne påvirkes følgelig af designet i alle skala.

Netop den situation at solcellepanelerne ligger i faste mål er en væsentlig begrænsning for arkitektonisk integration, da den kreative proces af den grund i udpræget grad hæmmes.

Ingen af de undersøgte solcellepaneler har et design der gør det muligt at opnå hverken et tilstrækkeligt lysniveau indenfor eller et tilstrækkeligt udsyn fra rummet bag facaden gennem panelerne alene. Afhængig af årstid og tidspunkt på dagen, vil der derfor være brug for enten supplerende elektrisk lys eller supplerende solafskærmning pga. blænding fra de transparente områder i panelerne. De lysfiltrerende solceller bør altså ikke bruges som erstatning for vinduer, men som en komponent der kan erstatte opake materialer i en facade og dermed øge lysindfaldet, eller som erstatning for dele af klart glas i facader, hvor for stort lys- og varmeindfald er et problem.

Optiske målinger viser, at der er en lineær sammenhæng mellem panelernes g-værdier og åbningsgraderne, dvs. det areal hvor igennem lys kan passere. Det betyder at man, for en givet facadekomposition, kan beregne de aktuelle g-værdier. Beregningerne kan således bruges iterativt i udviklingsfasen af et bygge – eller renoveringsprojekt, til at optimere facadens g-værdi. Det skal understreges, at beregningen kun er gældende for den aktuelle bygning, men da der alligevel skal udføres en beregning på alt nyt byggeri, er g-værdiberegningen en relativt lille del i forhold til det designredskab det er.

Fra et termisk synspunkt er det afgørende at der mellem solcellerne og rummet er glas med en U-værdi ikke højere end en lavenergirude for at adskille det inderste glas ind i rummet fra den varmeabsorberende del (solcellerne) der ellers vil stråle varme ind i rummet og skabe overophedning. Termiske simuleringer har vist, at der for panelerne bliver meget stor forskel i temperatur på det inderste og yderste glas i konstruktionen. Det yderste glas kan blive helt op til 80 grader mens det inderste glas i lavenergirude/solcelle-kombinationen, bliver mindre varmt end en almindelig lavenergirude. På trods af at den høje temperatur på yderste glas sandsynligvis kun opnås få timer om året, er det er muligvis et dilemma i forhold til anvendelse i enfamiliehuse pga. risikoen for at

brænde sig. Det skal bemærkes at denne udfordring eksisterer for flere andre konstruktionsmaterialer/facadebeklædninger og der eksisterer ingen regler på det felt.

Samlet set giver solcellepaneler altså mindre risiko for overophedning inde i rummet end almindelige lavenergiruder, da varmestrålingen afsættes i det yderste lag glas i stedet for at blive transmitteret ind på det inderste glas.

Prisen på lysfiltrerende solcellepaneler er højere end prisen på traditionelle solcellepaneler målt som pris pr. Wp, hvilket er en reel udfordring i forhold til anvendelse. Denne forskel i pris forventes dog at blive mindre i takt med efterspørgslen på mere specialiserede produkter stiger, men forventes stadig at ligge højere da fremstillingen af de lysfiltrerende solcellepaneler er mere kompleks. Et mål med dette projekt er derfor at anskueliggøre de lysfiltrerende solcellepaneler som et multifunktionelt bygge-element med de tillægsværdier disse produkter har i forhold til traditionelle, lysblokerende solcelleprodukter, som vil kunne opveje merprisen.

De lysfiltrerende egenskaber af solcellepanelerne har vist nye muligheder for interessante facadedesign. Ud over at filtrere lyset udefra og ind i rummet, vil panelerne, når det er mørkere ude end inde, filtrere lyset indefra og ud og dermed formidle livet og aktiviteterne indenfor. Også spejlinger fra bagsiden af panelerne kan bruges til at opnå spændende rumlige effekter inden i rummet, f.eks. styring af dagslys.

Fleksible, mobile installationer, dvs. hvor solcellepanelerne kan bevæges i forhold til de transparente åbninger, har vist sig at indeholde interessante potentialer både arkitektonisk, termisk og lysteknisk. Det bliver muligt at opnå et bedre indeklima og et lavere energiforbrug i lokalet bag, hvis man om sommeren kan holde en del af sollyset ude og på den vis reducere kølebehovet mens man om vinteren kan flytte panelerne helt væk fra vinduet og tillade et solindfald der bidrager til en reduktion af opvarmningsbehovet. De fleksible installationer er også attraktive rent arkitektonisk, da facaden kan producere forskellige rumligheder, der aktiverer brugeren til at indtage rummet på forskellig vis, afhængig af placeringen af solcellerne. Rummet vil derfor fremstå 'levende' og udtrykke livet bag facaden. En fleksibel indstilling af panelerne vil desuden øge muligheden for regulering af dagslys i rummet i løbet af dagen og året.

Der er i projektet ikke defineret 'det perfekte lysfiltrerende solcellepanel', da forskellige vurderingskriterier ofte vil 'trække i hver sin retning', f.eks. vil stor lystransparens være godt for det indvendige lysniveau, men mindre godt i forhold til blænding og overophedning af rummet bag facaden. Forskellige anvendelser vil således fordre forskellige designs og kunsten er således at afveje hvilke behov der er væsentligst at opfylde i den givne situation. Samlet set, vurderes en kombination af åbne, lukkede og lysfiltrerende felter i facaden at have et stort potentiale såvel termisk, lysteknisk, elektrisk og arkitektonisk.

Formidling har været en nøgleaktivitet og mange forskellige fora er brugt i projektet for at kommunikere budskaber og resultater ud til et bredt publikum både nationalt og internationalt. Den væsentligste aktivitet har været afholdelse og publikation af workshoppen 'LYS+ENERGI+ARKITEKTUR' der blev gennemført på Arkitektskolen Århus med deltagelse af 40 danske og udenlandske studerende samt ca. 500 gæster. På workshoppen blev de lysfiltrerende solcellepaneler vist frem i rumstore mock-ups for på den vis bedst muligt at formidle potentialer og udfordringer. De faglige vurderinger af solcellepanelerne er samlet i en rigt illustreret publikation, der er sendt ud til danske tegnestuer som en mulig platform til inspiration og dokumentation af potentialerne for de lysfiltrerende solcellepaneler der findes på markedet.